

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

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

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Часть 1

Москва

УДК 001.89:[621.373.826+533.9+539.2+621.384+530.1+006.92:531.761](06)
ББК 72г
М 43

V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019: Сборник научных трудов. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – 348 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2019», которая пройдет с 12 февраля по 15 февраля 2019 года в НИЯУ МИФИ. Организатором конференции выступает Институт лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: лазерная физика и лазерные технологии; физика плазмы и плазменные технологии; сверхсильные лазерные поля; управляемый термоядерный синтез; современные проблемы теоретической физики; современные проблемы физики твердого тела, функциональных материалов и наносистем; ускорители заряженных частиц и радиационные технологии; современные проблемы квантовой метрологии, физика высокой плотности и энергии, электрофизическое и ядерное приборостроение.

Статьи получены до 31 января 2019 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственные редакторы

- Соловьев И.А.
- Степаненко А.А.

ISBN 978-5-7262-2544-9

©Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2019

Подписано в печать 11.02.2019. Формат 60×84 1/16
Печ. л. 21,75. Тираж 350 экз. Заказ № 8.

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

Программный комитет конференции

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

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

Организационный комитет конференции

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ

О.И. БЕРДАСОВ, А.Ю. ГРИБОВ, Д.В. СУТЫРИН, Р.И. БАЛАЕВ, Е.Ф. СТЕЛЬМАШЕНКО, Д.М. ФЕДОРОВА, С.Ю.АНТРОПОВ, Г.С. БЕЛОТЕЛОВ, А.Н. МАЛИМОН, С.Н. СЛЮСАРЕВ Оптический стандарт частоты для национальной шкалы времени	22
Д.Д. КОЗЛОВ, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ Эффект Штарка и сдвиги частоты в щелочных и щелочноземельных атомах, обусловленные излучением черного тела	24
С.М. ИГНАТОВИЧ, М.Н. СКВОРЦОВ, В.И. ВИШНЯКОВ, Н.Л. КВАШНИН, В.А. ВАСИЛЬЕВ, Д.В. БРАЖНИКОВ, В.И. ЮДИН, А.В. ТААЙЧЕНАЧЕВ, С.Н. БАГАЕВ, И.Ю. БЛИНОВ, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ, Ю.С. САМОХВАЛОВ, Д.А. ПАРЁХИН, Е.А. ЗОТОВ, М.П. МАЛАХ Сверхминиатюрный рубидиевый атомный стандарт частоты, основанный на использовании эффекта когерентного пленения населенностей	25
М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, А.Б. ЕГОРОВ, С.А. ЗИБРОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ Исследование и оптимизация параметров атомных ячеек для КПН-стандартов частоты	28
Д.С. ЧУЧЕЛОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, С.А. ЗИБРОВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ Оптический метод выделения метрологического резонанса Рэмси	30
Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А. МИШИН, Д.О. ТРЕГУБОВ, Е.С. ФЕДОРОВА, А.А. ГОЛОВИЗИН, В.Н. СОРОКИН, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ Глубокое лазерное охлаждение атомов тулия с использованием методики SWAP	32
Д.А. МИШИН, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.О. ТРЕГУБОВ, Е.С. ФЕДОРОВА, А.А. ГОЛОВИЗИН, В.Н. СОРОКИН, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ Использование оптической накачки для подготовки внутренних состояний атомов тулия	34
П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ, С.П. ДЕРЕВЯШКИН, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ, Ю.Ю. ЛЕБЕДИНСКИЙ, С.С. ПОТЕШИН, А.А. СЫСОЕВ, Е.В. ТКАЛЯ, Д.О. ТРЕГУБОВ, В.И. ТРОЯН,	

К.Ю. ХАБАРОВА, В.П. ЯКОВЛЕВ	
Ионы тория в линейной квадрупольной ловушке.....	36
С.С. ПОТЕШИН, Н.Н. КОМАР	
Охлаждение ионов в динамических потенциальных ямах.....	38
И.Н. ДРИБАС, А.С. БОРИСЕНКО, И.В. ЗАЛИВАКО, И.А. СЕМЕРИКОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ	
Колебательные состояния лазерно-охлажденных ионов иттербия в радиочастотной ловушке.....	40
Е.Ф. СТЕЛЬМАШЕНКО, В.Н. БАРЫШЕВ, В.А. ТИЩЕНКО, И.Ю. БЛИНОВ	
Первые результаты измерений напряженности электрического поля на основе квантовых энергетических переходов в атоме ^{85}Rb	43
Е.А. ЦЫГАНКОВ, С.А. ЗИБРОВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, С.В. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ, А.С. ПОЛЯКОВ, В.П. ЯКОВЛЕВ	
Усиление уединенного магнитооптического резонанса в модулированном радиочастотном поле.....	45
В.Я. ШИФРИН, А.Е. ШИЛОВ, Д.И. БЕЛЯКОВ, Д.Д. КОСЕНКОВ	
Применение квантового цезиевого магнитометра для передачи единицы магнитной индукции в область «средних» магнитных полей.....	47
У.Н. КУРЕЛЬЧУК, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ	
Термоэлектрические и электронные свойства модельных нанокластерных материалов.....	49
П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ, Ю.Ю. ЛЕБЕДИНСКИЙ	
Металлические нанокластерные пленки с градиентным распределением нанокластеров по размерам как новый фотовольтаический материал.....	51
А.Д. ЛЕВИН, М.К. АЛЕНИЧЕВ, А.Ю. САДАГОВ, С.В. ДЕЖУРОВ, Д.В. КРЫЛЬСКИЙ, О.А. БАРАНОВА, А.В. ЧЕКАНОВ, А.А. ЮШИНА	
Флуоресцентные наносенсоры на коллоидных квантовых точках	53
К.С. КРАВЧУК, В.Н. РЕШЕТОВ, А.А. РУСАКОВ, В.В. СОЛОВЬЁВ, А.С. УСЕИНОВ	
Применение конфокальных хроматических зондов для исследования шероховатости и геометрии макрообъектов.....	55

Секция

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ

М.А. SALEM, К.Р. KATIN, М.М. MASLOV	
Electronic structure calculation silicon of and nitrogen fullerenes using density functional calculations	58

Д.А. АБИН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.В. АНИЩЕНКО, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, А.И. ПОДЛИВАЕВ, И.А. РУДНЕВ	
Прототип левитационного подшипника с внутренним сверхпроводящим статором	60
Ю.В. АГРАФОНОВ, И.С. ПЕТРУШИН	
Аморфизация жидкости (расплава) со сферическими потенциалами межмолекулярного взаимодействия	62
Л.Е. АГУРЕЕВ, С.В. САВУШКИНА, А.А. АШМАРИН, К.А. АНИКИН	
Исследование композита Al-Zr с керамикоподобным покрытием, полученным методом плазменного электролитического оксидирования	64
И.В. АНИЩЕНКО, Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ	
Моделирование магнитных подшипников на основе композитных ВТСП лент	66
П.И. БЕЗОТОСНЫЙ, К.А. ДМИТРИЕВА, С.Ю. ГАВРИЛКИН, А.Н. ЛЫКОВ, А.Ю. ЦВЕТКОВ	
Исследование критического состояния неоднородных сверхпроводящих пленок толщиной порядка длины когерентности ..	68
А.А. ВАСИН, П.С. ВЕРВИКИШКО, Т.М. ФАЛЯХОВ, М.А. ШЕЙНДЛИН	
Полихроматический пирометр для измерения температуры при лазерном нагреве	70
Д.Е. ВЕРВИКИШКО, С.А. КОЧАНОВА, И.А. ЛИПАТОВА, Е.И. ШКОЛЬНИКОВ	
Разработка и исследование углеродных функциональных материалов для суперконденсаторов и алюминий-ионных аккумуляторов	72
П.С. ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН	
Изучение плавления карбида кремния в диапазоне давлений 1-2000 бар	74
П.С. ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН	
Изучение процессов кристаллизации и конденсации углерода при давлениях свыше 200 бар	76
П.С. ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН	
Последние достижения в изучении плавления графита методом лазерного нагрева	78
П.С. ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН, Д.Е. ВЕРВИКИШКО, Е.И. ШКОЛЬНИКОВ	

Исследование свойств нанодисперсных порошков, полученных методом лазерного испарения графита	80
Б.Р. ГАЙНАНОВ, В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.А. ИВАНОВ, А.В. КУЗНЕЦОВ, А.А. ЯРОСЛАВЦЕВ, Ф. Д'АКАПИТО, А. ПУРИ	
Локальный беспорядок в геометрически фрустрированных пироклорах $\text{Ln}_2\text{M}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$, $\text{M} = \text{Zr}, \text{Ti}$)	82
А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ, Л.П. СУХАНОВ, Р.Г. ЧУМАКОВ, В.Г. СТАНКЕВИЧ	
Теоретическое исследование физической адсорбции полярных молекул C_6OF_{18} на различных поверхностях	84
П.Д. ГРИГОРЬЕВ	
Природа магнитных осцилляций в высокотемпературных сверхпроводниках YBCO	86
Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, К.С. ГРИШАКОВ, Е.А. МАЗУР	
Электронные и фононные свойства «трубчатого» гидрида лантана под давлением	88
А.Б. ДЮБУА, А.А. ИВАНОВА, А.Н. КОНЮХОВ, Е.С. КУЛИКОВА, С.Н. МАШИНА, А.С. САФОШКИН	
Возбуждение поверхностного поляритона на графене	90
А.Ф. ЗАЦЕПИН, А.Н. КИРЯКОВ, Д.А. ЗАЦЕПИН, Н.В. ГАВРИЛОВ	
Плазменная модификация ионами меди оптической керамики алюмомагнетитовой шпинели	92
З.А. ИСАХАНОВ, З.Э. МУХТАРОВ, Б.Э. УМИРЗАКОВ, Ж.Ш. СОДИКЖАНОВ	
Сравнительный количественный анализ состава поверхности промышленных образцов тугоплавких металлов методом ЭОС и ВИМС	94
Е.А. ИСУПОВА, В.А. ИВАНОВ, П.В. АНДРЕЕВ, М.А. ФАДДЕЕВ	
Получение и исследование ряда кристаллов КТР с примесями	96
П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ	
Микроскопический расчёт коэффициентов феноменологической модели Ротварфа-Тейлора для релаксации возбуждения в ВТСП	98
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ	
Наноструктурные ионно-плазменные покрытия Mo-Hf-Si-B и Mo-Zr-Si-B с высокой жаростойкостью в температурном диапазоне 1000-1500 $^{\circ}\text{C}$	100
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, Е.А. ЛЕВАШОВ	

Твёрдые износостойкие покрытия Ti-Ni-Al-C-N полученные методом магнетронного распыления СВС-мишеней в режиме DCMS и HIPIMS	102
Ю.В. КИСЛИНСКИЙ, К.И. КОНСТАНТИНЯН, И.Н. ДЮЖИКОВ, А.М. ПЕТРЖИК, А.В. ШАДРИН	
Электронный транспорт в иридатах стронция со спин-орбитальным взаимодействием: SrIrO ₃ и Sr ₂ IrO ₄	104
О.В. КОМЛЕВА, Д.В. ФОМИНСКИЙ, В.Н. НЕВОЛИН, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, Н.А. РУБИНКОВСКИЙ	
Сравнительные исследования каталитических свойств аморфных и кристаллических пленок MoSX для получения водорода	106
В.С. КОРОТКОВ, П.А. БРАЖНИК, А.А. КАРТАМЫШЕВ	
Применение эквивалентной схемы для расчета потерь при импульсном намагничивании короткозамкнутых ВТСП-катушек ...	108
И.Н. КОЦ, В.С. КЛИМИН, В.В. ПОЛЯКОВА, А.А. РЕЗВАН, О.А. АГЕЕВ	
Формирование наноразмерных структур комбинированием методов фокусированных ионных пучков и плазмохимической обработки	110
А.Е. КРЮКОВА, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ	
Поиск распределений частиц по размерам путем комбинирования методов минимизации на примере данных малоуглового рассеяния от раствора кремнезоля	112
Н.А. КУДРЯШОВ, Р.В. МУРАТОВ, П.Н. РЯБОВ	
Математическое моделирование процессов локализации пластической деформации в материалах	114
В.С. ЛИТВИН, В.А. УЛЬЯНОВ, В.Г. СЫРОМЯТНИКОВ, Д.А. БУЧНЫЙ, А.А. СТОЛЯРОВ, Д.Н. ТРУНОВ, С.Н. АКСЕНОВ, В.Н. МАРИН, С.И. ПОТАШЕВ, Р.А. САДЫКОВ	
Первый рефлектометрический эксперимент на установке «Горизонт» на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН	116
А.В. ЛИТВИНОВ, Ю.А. КЛИШИН, Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ	
Исследование структуры мдп-сенсора методами электронной микроскопии и рентгеноспектального анализа	118
И.В. МАЛИКОВ, В.А. БЕРЕЗИН, Л.А. ФОМИН	

Исследование магнитных свойств пленок сплава Гейслера Co ₂ FeAl, выращенных на R- и A-плоскостях сапфира для спин-инжекционной ТГц-фотоники	120
Б.П. МИХАЙЛОВ, В.Я. НИКУЛИН, А.Б. МИХАЙЛОВА, П.В. СИЛИН, И.В. БОРОВИЦКАЯ, В.Ф. ШАМРАЙ Влияние материала защитного экрана на критический ток сверхпроводника при ударно – волновом воздействии плазмы	122
Т.И. МОГИЛЮК, П.Д. ГРИГОРЬЕВ Магнитные осцилляции внутрислойной проводимости в квазидвумерных металлах	124
А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ, И.А. РУДНЕВ Влияние импульсов магнитного поля на вихревую систему ВТСП	126
Ж.Х. МУРЛИЕВА, Д.К.ПАЛЧАЕВ, М.Х. РАБАДАНОВ, М.Э.ИСХАКОВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ Корреляция температурных коэффициентов электросопротивления и объемного теплового расширения интерметаллида Ti ₆₇ Al ₃₃	128
Н.П. НЕТЕСОВА Электронная плазменная модель кристалла триглицинсульфат	130
Д.К. ПАЛЧАЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, А.Э. РАБАДАНОВА Температурные коэффициенты электросопротивления и объемного теплового расширения YBCO вблизи ТС	132
Г.В. ПАНАСОВА, С.В. САВУШКИНА, А.М. БОРИСОВ, А.А. АШМАРИН, И.О. КОНДРАЦКИЙ Исследование керамикоподобных диоксид циркониевых покрытий, формируемых микродуговым окислением с добавлением субмикронного порошка оксида иттрия	134
С.В. ПОКРОВСКИЙ, А.А. БУРА, И.В. АНИЩЕНКО, Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ, И.А. РУДНЕВ Исследование динамических процессов в ВТСП лентах второго поколения при импульсных токовых нагрузках	136
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, Б.Р. ГАЙНАНОВ, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, А.А. ИВАНОВ, Ф. Д'АКАПИТО, А. ПУРИ, Г.Р. КАСТРО, И.В. ЩЕТИНИН, М.В. ЖЕЛЕЗНЫЙ, Н.А. ЦАРЕНКО, Л.А. АРЖАТКИНА, К.В. ПОКРАТОВ Обратимый фазовый переход «порядок–беспорядок–порядок» в сложных оксидах (Y _b xPr _{1-x}) ₂ (Ti _y Zr _{1-y}) ₂ O ₇ (0 < x < 1, 0 < y < 1)	137

В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.Ю. МОЛОКОВА, М.М. БЕРДНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ, В.А. ГРИГОРЬЕВ, Е.В. ХРАМОВ, И.В. ЩЕТИНИН, М.В. ЖЕЛЕЗНЫЙ, Н.А. ЦАРЕНКО, Н.В. ОГНЕВСКАЯ, К.В. ПОКРАТОВ	
Влияние условий синтеза на кристаллическую и локальную структуру порошков MoO_3	140
А.Р. ПРИЩЕПА, А.В. САДАКОВ	
Термодинамические измерения железосодержащего сверхпроводника VKF_A в магнитном поле по методу АС-калориметрии	142
Р.Ш. РАМАКОТИ, О.Б. АНАНЬИН, А.П. МЕЛЕХОВ, И.А. ГЕРАСИМОВ, Г.С. БОГДАНОВ, В.Г. СРЕДИН, И.К. НОВИКОВ, Д.С. ДОМАНИН, И.В. ФРОЛОВА	
Нетепловой механизм дефектообразования в полупроводнике CdHgTe под действием мягкого рентгеновского излучения.....	144
А.А. РЕЗВАН, В.С. КЛИМИН, Р.В. ТОМИНОВ, М.С. СОЛОДОВНИК, О.А. АГЕЕВ	
Безмасочное формирования наноразмерного рельефа на поверхности GaAs методом плазмохимического травления.....	146
Д.А. РОДИОНОВ, И.В. ЗАГОРОДНЕВ	
Поглощают ли магнитоплазмы в неограниченном двумерном электронном газе электромагнитное излучение?	148
Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, И.С. ВАСИЛЬЕВСКИЙ, Д.А. САФОНОВ, А.А. СОЛОВЬЕВ, А.А. ИВАНОВ	
Формирование метастабильной в-насыщенной фазы $t\text{-BC}_3$ при импульсном лазерном плавлении	151
П.С. САВЧЕНКОВ, П.А. АЛЕКСЕЕВ	
Влияние промежуточной валентности на механизм магнитного упорядочения системы $(\text{Pr}, \text{La})\text{Ni}$	153
А.А. СИНЧЕНКО, П.Д. ГРИГОРЬЕВ, П. МОНСО	
Эффект Холла в трителлуридах редкоземельных атомов	155
А.В. СКОБЁЛКИНА, Ф.В. КАШАЕВ, А.В. КОЛЧИН, С.В. ЗАБОТНОВ, Л.А. ГОЛОВАНЬ, Т.П. КАМИНСКАЯ, М.Ю. КИРИЛЛИН, А.В. ХИЛОВ, Д.А. КУРАКИНА, П.К. КАШКАРОВ	
Биофотоника кремниевых наночастиц, сформированных импульсной лазерной абляцией пористого кремния в жидкостях	157
К.Л. СМЕРНОВ	
Применение высокоэнергетических процессов в разработке сиалоновой керамики	159

А.В. СОЛДАТЕНКО, П.Н. ДЕГТЯРЕНКО, А.С. МАНКЕВИЧ, В.А. АМЕЛИЧЕВ, В.Н. ЧЕПИКОВ	
Исследование влияния параметров осаждения буферных слоев на текстуру и сверхпроводящие свойства промышленных 2G ВТСП лент	161
А. СОЛОВЬЕВ, В. ФОМИНСКИЙ, В. ЗУЕВ, Р. РОМАНОВ, А. ГОЙХМАН	
Электрофизические и газосенсорные свойства тонкопленочной структуры ВСх/SiC	163
И.А. СОРОКИН, Д.В. КОЛОДКО, Е.Г. ШУСТИН, В.А. ЛУЗАНОВ, М.П. ТЕМИРЯЗЕВА, Е.Н. МИРГОРОДСКАЯ	
Синтез пленок нанокристаллического графита в разряде с полым катодом	165
Е.Ю. СОШИНСКАЯ, В.А. АНАШКИН, И.Д. ДЕЛЬЦОВ, Л.А. ДАДИНОВА	
Структурные исследования CBS-пирофосфатазы методами малоуглового рентгеновского рассеяния и молекулярного докинга	167
А.С. СТАРИКОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.А. РУДНЕВ	
Особенности взаимодействия стопок ВТСП-лент с наборами постоянных магнитов различной конфигурации	169
В.В. СЫЧУГОВ, Е.П. КРАСНОПЕРОВ, В.С. КОРОТКОВ, А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО, С.В. ШАВКИН	
Изучение критических параметров ленты ВТСП при аксиальном сжатии галетной обмотки.....	171
Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ, Ж.Ш.СОДИКЖАНОВ, А.Н. УРОКОВ, У.Ф. ИБОДУЛЛАЕВ	
Влияние ионной бомбардировки на плотности состояния валентных электронов пленок CdS	173
Б.Е. УМИРЗАКОВ, Б.Д. ДОНАЕВ	
Оптические свойства тонких пленок GaAlAs/GaAs	175
Б.Е. УМИРЗАКОВ, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, М.Б.ЮСУПЖОНОВА, Х.Х. БОЛТАЕВ, Ш.А.СУЯРКУЛОВ,	
Влияние разупорядочения тонких поверхностных слоев на электронные свойства Si (111)	177
Б.Е. УМИРЗАКОВ, Ё.С. ЭРГАШОВ	
Экспериментальное и теоретическое исследование влияние бомбардировки ионами Ag ⁺ на спектр валентных электронов монокристалла Si(111)	179
Д.В. ФИЛИПЧУК, А.В. ЛИТВИНОВ, А.А. МИХАЙЛОВ, М.О. ЭТРЕКОВА	

Исследование влияния изменения относительной влажности окружающего воздуха на показания газового детектора на основе МДП-сенсора	181
Д.В. ФОМИНСКИЙ, О.В. КОМЛЕВА, В.Н. НЕВОЛИН, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, Н.А. РУБИНКОВСКИЙ	
Бифункциональный тонкопленочный катализатор Mo-Ni-S для расщепления воды.....	183
А.В. ФРОЛОВ, А.П. ОРЛОВ, В.А. ШАХУНОВ, А.А. СИНЧЕНКО, П. МОНСО	
Пик-эффект в квазидвумерных материалах с волной зарядовой плотности RTe ₃	185
А.М. ФРОЛОВ, Т.М. ФАЛЯХОВ, С.В. ПЕТУХОВ	
Исследование испарения карбида тантала и графита при температурах свыше 4000 К.....	187
А.М. ФРОЛОВ, М.А. ШЕЙНДЛИН, А.А. ВАСИН	
Сравнительный анализ сублимации углеродного волокна и графита МПГ-7 при температурах свыше 3500 К.....	189
М.Б. ШАВЕЛКИНА, Е.И. ШКОЛЬНИКОВ, С.А. КОЧАНОВА, Р.Х. АМИРОВ	
Суперконденсатор на основе синтезированных в струе плазмы углеродных наноматериалов	191
В.А. ШАХУНОВ, Г.А. ОВСЯННИКОВ, Т.А. ШАЙХУЛОВ, А.М. ПЕТРЖИК	
Напряженность эпитаксиальных манганитных пленок, выращенных с помощью лазерной абляции	193
В.С. ШУСТОВ, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ, А.Б. АНКУДИНОВ, Н.М. РУБЦОВ	
Модифицирование пористой поверхности нержавеющей стали наноструктурным оксидом алюминия	195
И.В. ЩЕТИНИН, В.П. МЕНУШЕНКОВ ¹ , Р.В. СУНДЕЕВ, М.В. ЖЕЛЕЗНЫЙ, А.Г. САВЧЕНКО	
структура и магнитные свойства сплавов на основе соединения Sm ₂ Fe ₁₇ N _x , полученных методом интенсивной пластической деформации кручением	197
М.О. ЭТРЕКОВА, А.В. ЛИТВИНОВ, А.А. МИХАЙЛОВ	
Прототип детектора паров нитросодержащих веществ на основе МДП-сенсора.....	199
А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.И. БЕСКРОВНЫЙ, Д. НЕОВ, К.В. ПОНКРАТОВ	

Исследование влияния типа РЗЭ и температуры отжига прекурсоров на структурные упорядочения в системе $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Yb}, \text{Y}$)	201
Д.С. ЯШКИН, И.В. КУЛИКОВ, В.С. КОРОТКОВ, М.Я. ЧЕРНЫХ Создание сверхпроводящего контакта на основе ВТСП лент второго поколения	203

Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Н.Н. АРСЕНЬЕВ, А.П. СЕВЕРЮХИН, В.В. ВОРОНОВ, НГУЕН ВАН ДЖАЙ Пигми и гигантский дипольный резонансы в $48,50\text{Ca}$ и $68,70\text{Ni}$	206
М.Е. БОРИСОВ, Д.Н. ВОСКРЕСЕНСКИЙ, Е.Э. КОЛОМЕЙЦЕВ Флуктуации числа частиц и заряда в сильновзаимодействующем нагретом пионном газе	208
М.Л. ГОРЕЛИК, Б. А. ТУЛУПОВ, М. Г. УРИН Свойства изоскалярных мультипольных гигантских резонансов в рамках полумикроскопической модели	210
А.М. ГРУДИНИНА, Н.С. ВОРОНОВА, Ю.Е. ЛОЗОВИК Исследование основного состояния экситона с анизотропной массой	212
Е.О. ДМИТРИЕВ, Ф.А. КОРНЕЕВ, Р. НЮТЕР, В. ТИХОНЧУК Обмен угловым орбитальным моментом между волной и частицей в лазерной плазме	214
Г.В. КОЛОМИЙЦЕВ, М.Г. УРИН Релаксация гигантских резонансов в сферических ядрах с развитым спариванием нуклонов: полумикроскопическое описание	216
К.С. КРЫЛОВ, В.Д. МУР, А.М. ФЕДОТОВ О свойствах уравнения Дирака в сильном короткодействующем электростатическом поле	218
Т.А. ЛОМОНОСОВА О рождении и каскадных распадах тяжёлых нестандартных хиггсовских бозонов	220
Т.В. МАКСИМОВ, И.Л. КУРБАКОВ, Ю.Е. ЛОЗОВИК Бозе-конденсация фотонов в резонаторе с двумерным электронным газом	222
В.В. МАРИНЮК, С.В. ШЕБЕРСТОВ	

Малоугловое отражение света от случайной среды с дальними корреляциями флуктуаций диэлектрической проницаемости	224
А. А. МИРОНОВ, А. М. ФЕДОТОВ	
Расчет радиационных поправок к массовому оператору в постоянном скрещенном поле	226
С.В. ПОПРУЖЕНКО, В.А. ТУЛЬСКИЙ	
Генерация терагерцового излучения высокой интенсивности при ионизации газов бихроматическими циркулярно поляризованными лазерными импульсами	227
С.В. ПОПРУЖЕНКО, М. ЧЬЯППИНА, С.В. БУЛАНОВ, Г. КОРН, Т. ДИТМАЙЕР, С. ВЕБЕР	
Измерение сверхвысоких интенсивностей лазерного излучения с использованием многократной ионизации атомов	230
М.А. ПОСАЖЕНКОВ, Н.С. ВОРОНОВА	
Распространение и самолокализация конденсата экситонных поляритонов.....	232
А.П. СЕВЕРЮХИН	
Анализ распределения силы E1 переходов атомных ядер в теории случайных матриц.....	234
С.А. СУББОТИН, Н.С. ВОРОНОВА, Ю.Е. ЛОЗОВИК	
Гидродинамика холодной экситонной сверхтекучей жидкости	235
А.М. ФЕЩЕНКО, А.А. ТИЩЕНКО, М.Н. СТРИХАНОВ, В.З. ВАГНЕР	
Когерентное излучение от модулированных электронных пучков в схеме комптоновского лазера	237
Б. А. ТУЛУПОВ, М. Г. УРИН	
Полумикроскопическое описание прямых+полупрямых E1 фотонейтронных реакций.....	239
К.С. КРЫЛОВ, К.П. КАТИН, М.М. МАСЛОВ, В.Д. МУР	
Настройка критического заряда примеси в бесщелевом графене механическим растяжением.....	241
Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, Д.Б. РОГОЗКИН	
Когерентное обратное рассеяние от случайной среды с круговым дихроизмом	243

Секция ФИЗИКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ И ЭНЕРГИИ

С.Ю. АНАНЬЕВ, А.Ю. ДОЛГООБОРОДОВ, Ф.А. АКОПОВ, Е.С. ЛУКИН, Н.А. ПОПОВА, А.В. СОЛДАТОВ, М. МАЗЕМ, Я. ЛИ, Дж. ВАЛДБОК, М. ДОССОТ, К. ДЕВО, Э. МАК РАЙ	
Прочностные характеристики углеродных нанотрубок и керамики SiC с добавлением нанотрубок.....	246
А.Б. АНКУДИНОВ, М.И. АЛЫМОВ, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ, И.М. МИЛЯЕВ	
Синтез магнитотвердого сплава системы Fe-Cr-Co из сферического порошка	248
С.М. ФРОЛОВ, И.О. ШАМШИН, В.С. АКСЕНОВ, И.В. БИЛЕРА, В.И. ЗВЕГИНЦЕВ, М.В. КОЗАЧЕНКО, П.А. ГУСЕВ	
Детонационная способность воздушных смесей продуктов пиролиза полипропилена	250
Ж.А. АМИР, С. ТУРСЫНБЕК	
Изучение горения газогенераторных составов с добавками углеродных порошков	252
А.А. АНИКЕЕВ, Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. ГУБИН	
Теория простых жидкостей и химическое равновесие. моделирование ударной адиабаты жидкого азота	254
И.А. АРТАМОНОВ, С.С. БАСАКИНА, П.В. КОМИССАРОВ	
Особенности проведения экспериментальных подводных взрывов в емкостях небольшого объема	256
С.С. БАСАКИНА, И.А. АРТАМОНОВ, П.В. КОМИССАРОВ	
Характеризация и особенности движения массива всплывающих пузырьков в условиях ограниченного стенками водоема	258
Ю.А. КУЗНЕЦОВА, Ю.В. БАТЬКОВ, А.М. ПОДУРЕЦ, В.Г. СИМАКОВ, И.А. ТЕРЕШКИНА, М.И. ТКАЧЕНКО, И.Р. ТРУНИН	
Влияние времени действия растягивающих напряжений на откольное разрушение сплава АМг6. Эксперимент и численное моделирование	260
Ю.А. БОГДАНОВА, И.В. МАКЛАШОВА, С.А. ГУБИН, В.А. ВЫСОЦКИЙ	
Универсальная модель уравнения состояния многокомпонентных газообразных/флюидных/твердых систем для термодинамического моделирования их свойств	262
А.С. БУРКАЦКИЙ, А.С. ЕГОРОВ, Д.А. ЛИТВИНОВ	
Электрические эффекты в кавитационной среде	264
О.Е. ВАЙС, В.Ю. БЫЧЕНКОВ	
Влияние пространственно-временных характеристик лазерного импульса на динамику электронов, ускоренных из его фокуса	266

П.А. ВЛАСОВ, В.Н. СМИРНОВ, О.Б. РЯБИКОВ, А.С. БОГАТОВА, А.Р. АХУНЬЯНОВ	
Самовоспламенение смесей H_2/O_2 и $H_2/O_2/CO$ в отраженных ударных волнах.....	268
Е.Г. ГРИГОРЬЕВ, В.Ю. ГОЛЫЦЕВ, Н.С. ЕРМАКОВА, А.В. ОСИНЦЕВ, А.С. ПЛОТНИКОВ	
Высоковольтная электроимпульсная консолидация тяжелых сплавов	270
В.Г. ВИНОГРАДОВ, Е.Г. ГРИГОРЬЕВ, Е.Л. СТРИЖАКОВ, С.В. НЕСКОРОМНЫЙ	
Высоковольтная сварка разнородных материалов	272
Д.А.ГОЖЕВ, С.Г.БОЧКАРЕВ, А.В.БРАНТОВ, В.Ю.БЫЧЕНКОВ	
Оптимизация генерации горячих электронов при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с нанотравой и нанослоями	274
Л.И.ГРИШИН	
Сравнительное исследование термитных составов для компактных источников тепла	276
С.А. ГУБИН, И.В. МАКЛАШОВА	
Термодинамические условия синтеза алмазов	278
А.С. ЕГОРОВ, А.С. БУРКАЦКИЙ, Р.В. КОЗАБАРАНОВ	
Исследование многопузырьковой сонолюминесценции в полярных и неполярных жидкостях.....	280
Е.Н. ЕСОПОВ, К.Н.ПАНОВ, Д.Н.ЗАМЫСЛОВ, М.О.ЛЕБЕДЕВА	
Определение распределения плотности потока частиц при выходе ударной волны на свободную поверхность металла рентгено-графическим методом	282
В.С. ИВАНОВ, А.Э. ЗАНГИЕВ, С.М. ФРОЛОВ	
Формирование облика непрерывно-детонационного прямооточного водородного воздушно-реактивного двигателя с числом маха полета 2 с помощью многомерного численного моделирования	284
Р.Д.КАПУСТИН, П.А.НИКОЛАЕНКО	
Исследование влияния взрыва на напряженно-деформированное состояние металлического контейнера с ячеистой огнеупорной энергозащитой	286
Е.Б. ГОРДОН, А.В. КАРАБУЛИН, В.И. МАТЮШЕНКО, М.Е. СТЕПАНОВ	
Выращивание металлических нанопроволок улучшенного качества в сверхтекучем гелии.....	288
A.R. KASIMOV, A. GONCHAR	
Analog modeling of reactive shock waves in periodic media	290

А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В. ОНУФРИЕВ, С.А. КОНЮХОВ, Н.Н. СЕРЕДКИН, Ю.Б. ПАТРИКЕЕВ	
Теплофизические свойства гадолиния при температурах 2000-4000 К	292
А.В. КУДИНОВ, Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. ГУБИН	
Молекулярно-динамическое моделирование термического разложения водородосодержащих веществ	294
А.И.САВВАТИМСКИЙ, С.В.ОНУФРИЕВ, С.А.МУБОЯДЖЯН, Г.Е. ВАЛЬЯНО	
Теплофизические свойства самого тугоплавкого карбида при быстром нагреве током (2000 – 5000 К)	296
А.П. КУРУЛЕНКО, И.В. ЗАНЕГИН, И.В. ШИБЕРИН	
Определение механических характеристик конструкционной стали АК-33 при статическом и динамическом нагружениях	298
Л.И. ЛИПЕНКОВА	
Влияние структуры гексогена-ТТ, полученного путем термовакuumной перекристаллизации, на газодинамические свойства ВС на его основе ..	300
Ю.А. БОГДАНОВА, И.В. МАКЛАШОВА, У.Д. ВАГИНА, Т.Д. ТРЕТЬЯКОВА	
Моделирование поведения гелия в области высоких давлений	302
А.Ю МАЛАХОВ, И.В. САЙКОВ, И.В. ДЕНИСОВ, Б.А РОМАНЦЕВ, Ю.В ГАМИН	
Получение биметаллических стержней и труб сваркой взрывом и горячей прокаткой	304
З.И. МАМЕДОВ	
Влияние потенциальных параметров компонентов на точность расчетов на основе Монте-Карло моделирования в зависимости от температуры и концентрации веществ	306
А.С. МАРТЫНЕНКО, И.Ю. СКОБЕЛЕВ, С.А. ПИКУЗ	
Определение параметров лазерной плазмы тонких фольг на начальных стадиях её разлёта	308
И.Н. МЕЛЬНИКОВ, К.А. МОНОГАРОВ, А.Н. ПИВКИНА	
Тепловая модель пиротехнического устройства для разрушения деталей отработавших космических аппаратов в плотных слоях атмосферы	310
Д.С. НОСУЛЕНКО, Д.А. ВИХЛЯЕВ, Д.С. ГАВРИЛОВ, К.В. САФРОНОВ, А.С. ТИЩЕНКО, П.А. ТОЛСТОУХОВ	
Измерение жесткого рентгеновского излучения из танталовых мишеней, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами	312
Е.В. ПЕТРОВ, И.В. САЙКОВ	

Исследование материалов после высокоэнергетической обработки потоком частиц.....	314
Д.С. ПЛАКСИНА	
Современные методы исследования горения и тушения резервуаров	316
И.В. САЙКОВ, М.И. АЛЫМОВ, В.Г. ВАДЧЕНКО	
Инициирование реакционных материалов ударно-волновым воздействием	318
В. Г. САЛАМАТОВ, А. И. КИРДЯШКИН, Р. М. ГАББАСОВ	
Особенности высокотемпературного горения композитных нитей Ni-Al, Ti-Al и Cu-Al	320
А.А.СЕЛЕЗЕНЕВ, Е.В.ГУСАРОВА, В.Ю.КОРОЛЕВ	
Исследование механизма распада молекул энергетических материалов методом молекулярной динамики	322
Н.Н. СЕРЕДКИН, С.В. ОНУФРИЕВ, А.И. САВВАТИМСКИЙ, Г.Е. ВАЛЬЯНО, С.А.МУБОЯДЖАН	
Теплофизические свойства тугоплавких защитных покрытий (ZrC; ZrC+C) в области их плавления и жидкой фазы (2000 – 5000 К).....	324
Т.О. СКЛЯДНЕВА, Е.Н. БОГДАНОВ	
Расчетно-теоретическое обоснование и экспериментальная отработка нагружающих устройств	326
В. А. СМЕТАНЮК, С. М. ФРОЛОВ	
Численный анализ смесеобразования и влияние неравномерности состава смеси на параметры работы детонационной кольцевой камеры сгорания	328
Е.Б. ГОРДОН, М.Е. СТЕПАНОВ, А.В. КАРАБУЛИН, В.И. МАТЮШЕНКО	
Сквид-магнитометрия никелевых нанопроволок, выращенных методом лазерной абляции в сверхтекучем гелии	330
С.А. ГУБИН, С.И. СУМСКОЙ	
Структура детонационной волны при скачкообразном изменении скорости звука в продуктах	332
А.С. УСТЮХИН, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ, М.И. АЛЫМОВ, А.Б. АНКУДИНОВ	
Влияние условий приготовления шихты на свойства порошкового магнитотвердого сплава Fe-30Cr-8Co	334
ФРОЛОВ С. М., БАСЕВИЧ В.Я., МЕДВЕДЕВ С.Н, ФРОЛОВ Ф. С.	
Космический эксперимент «Зарево»: беспламенное горение капли в условиях микрогравитации	336
В.А. ШАРГАТОВ, С.В. ГОРКУНОВ	
Два режима взаимодействия ударной волны с расположенными в канале препятствиями.....	338
В.С. ШУСТОВ, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ, А.Б. АНКУДИНОВ, Н.М. РУБЦОВ	

Модифицирование пористой поверхности нержавеющей стали наноструктурным оксидом алюминия	340
Я. Э. ПОРОШИНА, П. С. УТКИН, С. В. ФОРТОВА	
Численное исследование высокоскоростного соударения пластин с использованием широкодиапазонных уравнений состояния	342
В.П. ЕФРЕМОВ	
Детонационный режим разрушения материалов оптических световодов под действием лазерного излучения	344

Секция

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ

Руководитель секции

– член-корр. РАН, директор
ФИАН, профессор каф.78
НИЯУ МИФИ,
Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ

Секретари секции

– к.ф.-м.н., доцент каф. №78
П.В. Борисюк,
– ассистент У.Н. Курельчук.

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9914

E-mail: UNKurelchuk@mephi.ru

О.И. БЕРДАСОВ, А.Ю. ГРИБОВ, Д.В. СУТЫРИН, Р.И. БАЛАЕВ,
Е.Ф. СТЕЛЬМАШЕНКО, Д.М. ФЕДОРОВА, С.Ю.АНТРОПОВ,
Г.С. БЕЛОТЕЛОВ, А.Н. МАЛИМОН, С.Н. СЛЮСАРЕВ
*Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Всероссийский Научно-
Исследовательский Институт Физико-Технических и Радиотехнических
Измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»), Менделеево, Московская обл., Россия*

ОПТИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ ДЛЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ

В работе продемонстрирована экспериментальная схема введения в состав первичного эталона ГЭТ 1-2018 оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция в качестве оптического репера частоты. Представлены предварительные результаты сравнений частот оптического репера и водородного мазера, входящего в состав хранителей частоты и времени первичного эталона. Предложена схема формирования независимой локальной атомной шкалы времени с использованием оптического репера.

O.I. BERDASOV, A.YU. GRIBOV, D.V. SUTYRIN, R.I. BALAEV,
E.F. STELMASHENKO, D.M. FEDOROVA, S.YU. ANTROPOV,
G.S. BELOTELOV, A.N. MALIMON, S.N. SLYUSAREV
*Federal State Unitary Enterprise «Russian Research Institute of Physical, Technical and
Radiotechnical Measurements» (FSUE «VNIIFTRI»), Mendeleevo, Moscow reg., Russia*

THE OPTICAL FREQUENCY STANDARD FOR THE NATIONAL TIME SCALE

In this work we present an experimental scheme which makes the optical strontium lattice clock a part of the State Primary Standard of the time and frequency units and the national time scale GET 1-2018. The frequency comparisons preliminary results between optical clock and the hydrogen maser, which is a part of the time and frequency keeper ensemble of the primary standard, are presented. A scheme for the formation of an independent local atomic time scale based on optical clock has been proposed.

Особое место в физике занимают время и частота - физические величины, которые могут быть измерены с наименьшей неопределенностью. Оптические стандарты частоты (ОСЧ) демонстрируют на сегодняшний день наилучшие показатели точности и стабильности воспроизведения частоты. ОСЧ, использующие различные атомы и реперные переходы [1–5] уже созданы или активно разрабатываются в ведущих метрологических центрах и научных лабораториях мира.

Снижение неопределенности локальных шкал времени и последующее возможное переопределение секунды СИ на основе квантового перехода в оптической области [6] являются основными целями исследователей, разрабатывающих ОСЧ [7,8].

Во ФГУП ВНИИФТРИ разработан ОСЧ на нейтральных атомах ^{87}Sr , который включен в комплекс воспроизведения единиц времени и частоты первичного эталона ГЭТ 1-2018. В данной работе продемонстрирован вариант экспериментальной схемы сличения ОСЧ с ансамблем водородных мазеров – хранителей частоты, цезиевыми и рубидиевыми реперами. Предложен новый алгоритм определения частоты атомной системы, в который может быть включен ОСЧ. Проведены экспериментальные сравнения модели дрейфа водородного генератора, рассчитанного при помощи специального алгоритма, использующего результаты сличений с ансамблем водородных генераторов ($-8,1327 \times 10^{-17}$ в день), и модели, полученной посредством измерений с применением ОСЧ ($(-8,53 \pm 0,647941) \times 10^{-17}$ в день). Также в данной работе предложена схема формирования независимой локальной атомной шкалы времени с использованием оптического репера. Регулярные сличения частот ОРЧ с другими реперами в рамках новой модели находятся в процессе накопления данных на долговременном интервале.

Продолжение измерений на текущем уровне в течение следующих нескольких месяцев позволит определить значение абсолютной частоты ОРЧ относительно Cs и Rb реперов и относительно шкалы времени TAI, которая связана со шкалой UTC. Это позволит включить ОСЧ в качестве репера для определения атомного времени наравне с цезиевыми и рубидиевыми реперами частоты.

Список литературы

- [1] Poli, N., et al. Nuovo Cimento Rivista 36, 555 (2013)
- [2] Pizzocaro, M. et al. Metrologia 54, 102 (2017)
- [3] Huang Y, et al. Phys. Rev. Lett. 116, 013001 (2016)
- [4] Huntemann N. et al. Phys. Rev. Lett. 116, 063001 (2016)
- [5] Ushijima I. et al. Nat. Photon. 9, 185 (2015)
- [6] Gill P. J. Phys.: Conf. Ser. 723, 012053 (2016)
- [7] Бердасов О. И. и др. Квантовая электроника, 48, 5, 431 (2018)
- [8] Сутырин Д.В. и др. Квантовая электроника, 49, 2, (2019)

Д.Д. КОЗЛОВ^{1,2}, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ^{1,2}

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская область, Россия*

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

ЭФФЕКТ ШТАРКА И СДВИГИ ЧАСТОТЫ В ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ АТОМАХ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЧЕРНОГО ТЕЛА

В работе представлены результаты теоретических расчетов скалярных и тензорных компонент сдвигов частоты в атомах, обусловленных статическим эффектом Штарка в щелочных и щелочноземельных атомах. Эти данные используются для оценок эффектов излучения черного тела в атомных стандартах частоты.

D.D. KOZLOV^{1,2} V.G. PALCHIKOV^{1,2}

1National Research Institute for Physical-Technical and Radiotechnical Measurements,

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

STARK EFFECT AND FREQUENCY SHIFTS IN ALKALINE AND ALKALINE EARTH ATOMS CAUSED BY BLACK BODY RADIATION

The paper presents the results of theoretical calculations of scalar and tensor components of the frequency shifts in atoms caused by the static Stark effect in alkali and alkaline-earth atoms. This data is used to evaluate black body radiation effects in atomic frequency standards.

В данной работе проведен теоретический анализ влияния эффектов излучения черного тела на частоту «часовых» переходов в современных стандартах времени и частоты при использовании в качестве рабочих сред щелочных и щелочноземельных атомов. Подобные оценки представляют не только теоретический интерес, но они также важны и с практической точки зрения, поскольку эффекты излучения черного тела являются численно доминирующим источником неопределенностей в воспроизведении стандартами единиц времени и частоты. В работе приведены численные оценки вкладов излучения черного тела для атомных состояний, представляющих интерес с точки зрения современного эксперимента.

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. ТААЙЧЕНАЧЕВ^{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

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*

СВЕРХМИНИАТЮРНЫЙ РУБИДИЕВЫЙ АТОМНЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТЕЙ

В работе представлены результаты разработки сверхминиатюрных атомных часов на рубидиевой ячейке, основанных на применении эффекта когерентного пленения населенностей на D1-линии сверхтонкого расщепления основного состояния атома. Приведены основные метрологические характеристики разработанного стандарта, а частности, вариация Аллана на коротких и длинных интервалах усреднения.

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. BAGAYEV^{1,2}, I.YU. BLINOV⁴, V.G. PALCHIKOV^{4,5}, YU.S. SAMOKHVALOV⁴, D.A. PAREKHIN⁴, E.A. ZOTOV⁴, M.P. MALAKH⁴

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 Radiotechnical Measurements, Mendeleevo, Moscow Region, Russia*

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

SUBMINIATURE RUBIDIUM ATOMIC FREQUENCY STANDARD BASED ON THE EFFECT OF COHERENT POPULATION TRAPPING

The paper presents the results of the development for the subminiature atomic clocks on the rubidium cell, based on the application of the effect of coherent population trapping for D1 lines of the hyperfine splitting of the ground state of the atom. The main metrological characteristics of the developed standard are given, and in particular, the Allan variation on short and long averaging intervals.

Отсутствие в настоящее время малогабаритных высокостабильных квантовых стандартов частоты не позволяет реализовать в прецизионной аппаратуре потребителей потенциальные точности навигационной системы ГЛОНАСС.

Недостатком традиционных квантовых стандартов частоты на основе газовой ячейке является использование СВЧ резонатора, наличие которого не позволяет существенно уменьшить габариты такого стандарта. Использование эффекта когерентного пленения населенностей (КПН) позволяет отказаться от использования СВЧ резонатора, что позволяет кардинально уменьшить размеры стандарта при сохранении высоких метрологических характеристик.

Разработанный в настоящей работе сверхминиатюрный стандарт частоты времени и частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей является первым реализованным стандартом подобного типа в России, предназначенным для массового производства (Рис.1)

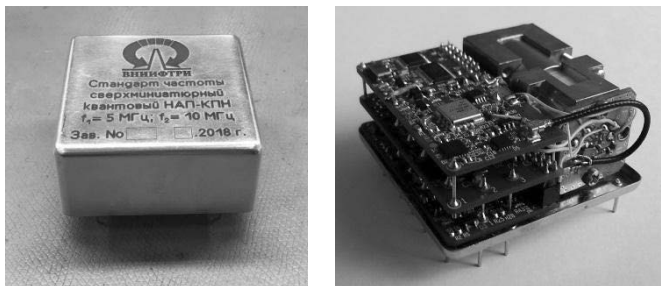


Рис.1. Атомный стандарт времени и частоты на КПН-эффекте с объемом 60 см^3 , с шириной и длиной-50 мм, высотой -24 мм: - общий вид (фото слева), -со снятой крышкой корпуса (фото справа).

В работе продемонстрирована долговременная непрерывная автономная работа (более нескольких месяцев) стандарта, а также достижение высокой долговременной нестабильности частоты (порядка нескольких

единиц $10(-12)$) на суточном интервале измерений, что соответствует передовому мировому уровню.

М.И. ВАСЬКОВСКАЯ¹, Д.С. ЧУЧЕЛОВ¹, А.Б. ЕГОРОВ³,
С.А. ЗИБРОВ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ¹, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}

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

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АТОМНЫХ ЯЧЕЕК ДЛЯ КПП-СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

В настоящее время важным направлением в развитии стандартов частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей (КПП) является уменьшение габаритных размеров в сочетании с повышением долговременной стабильности. Для решения этой задачи требуются резонансные ячейки, имеющие малые размеры, с тщательно отработанной технологией наполнения и герметизации. Для производимых методом лазерной сварки цилиндрических ячеек объемом около $0,5 \text{ см}^3$ найден метод наполнения щелочным металлом и буферными газами, обеспечивающий оптимальные характеристики ширины и контраста КПП-резонанса, а также квадратичную температурную зависимость его частоты в рабочей точке.

M.I. VASKOVSKAYA¹, D.S. CHUCHELOV¹, A.B. EGOROV³,
S.A. ZIBROV¹, V.V. VASSILIEV¹, V.L. VELICHANSKY^{1,2}

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

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

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

STUDY AND OPTIMIZATION OF ATOMIC CELL CHARACTERISTICS FOR CPT-CLOCKS

Nowadays, the main tasks in the development of frequency standards based on the effect of coherent population trapping (CPT) are reducing their size and improving their long-term stability. To solve these problems, small atomic cells with carefully selected regimes fabrication and filling parameters are required. For cylindrical atomic cells (volume is about 0.5 cm^3) sealed by laser welding we have found a method of filling the cells with alkali metal and buffer gases mixture, which provides optimal values of width and contrast of the CPT resonance and quadratic temperature dependence at the operation point.

Атомные ячейки для стандартов частоты на основе эффекта КПП [1] заполняются щелочным металлом (в нашем случае – ^{87}Rb) и смесью буферных газов ($\text{Ar}+\text{N}_2$), уменьшающей ширину и температурную зависимость центральной частоты КПП-резонанса, определяющей его максимально достижимый контраст.

Температурная зависимость частоты КПН-резонанса определяется формулой

$$\nu(T) = \nu + P_s[\beta + \delta (T - T_0) + \gamma (T - T_0)^2], \quad (1)$$

где P_s – давление при герметизации, β, δ, γ – коэффициенты, доступные в литературе [2,3] или определяемые экспериментально, T_0 – опорная температура, при которой измерены коэффициенты и в окрестности которой формула (1) справедлива. Если в атомной ячейке находится смесь газов, то β, δ, γ преобразуются в $\beta_t, \delta_t, \gamma_t$, зависящие от соответствующих коэффициентов для каждого газа и соотношения их давлений γ . Коэффициенты δ для Ag и N₂ имеют разные знаки, поэтому, выбрав правильное γ , можно свести к нулю линейную (оставив квадратичную) зависимость частоты КПН-резонанса от температуры, что уменьшает нестабильность частоты, вызываемую неизбежными флуктуациями температуры.

Известно, что стабильность стандарта частоты зависит от параметра качества резонанса Q и значения отношения сигнала к шуму, S/N . Оба параметра должны быть максимальными для наилучшей стабильности [4]. Параметр качества резонанса Q обратно-пропорционален ширине резонанса, а отношение S/N прямо пропорционально контрасту. Это означает, что КПН-резонанс должен обладать минимальной шириной и максимальным контрастом.

В настоящей работе предложен метод оптимизации параметров заполнения атомных ячеек, обеспечивающий наилучшие для стабильности характеристики КПН-резонанса. Метод заключается в регистрации зависимостей ширины и контраста резонанса от суммарного давления буферных газов, в результате которого определяется его оптимальное значение. После этого, для данного суммарного давления буферных газов выбирается такое соотношение парциальных давлений, при котором вершина параболической температурной зависимости совпадает с температурой, при которой контраст резонанса максимален.

Список литературы

- [1] S. Knappe, V. Shah, et al., Appl. Phys. Lett., 85(9), 1460, (2004).
- [2] J. Vanier, R. Kunski, et al., Journal of Applied Physics, 53, 5387, (1982).
- [3] O. Kozlova, S. Guérandel, E. Clercq, Phys. Rev. A, 83, 062714 (2011).
- [4] F. Riehle, “Frequency Standards: Basics and Applications”, Wiley-VCH, (2006)

Д.С. ЧУЧЕЛОВ,¹ Е.А. ЦЫГАНКОВ,¹ С.А. ЗИБРОВ,¹ М.И. ВАСЬ-
КОВСКАЯ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ¹ И В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}

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

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА РЭМСИ

В работе представлен метод идентификации центрального резонанса Рэмси в импульсном режиме регистрации резонанса когерентного пленения населённости. В интервале между импульсами накачки и детектирования ансамбль атомов подвергается действию вспомогательного поля того же спектрального состава, но много меньшей интенсивности. В результате соседние резонансы Рэмси уменьшаются по амплитуде по сравнению с центральным, что позволяет его однозначно идентифицировать. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическим описанием эффекта, выполненным для трехуровневой модели атома на основе решения уравнений для матрицы плотности.

D.S. CHUCHELOV,¹ E.A. TSYGANKOV,¹ S.A. ZIBROV,¹ M.I.
VASKOVSKAYA¹, V.V. VASSILIEV¹ AND V.L. VELICHANSKY^{1,2}

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

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

OPTICAL METHOD FOR THE METROLOGICAL RAMSEY FRINGE SELECTION

We propose a simple technique for identifying the central Ramsey fringe of pulsed coherent population trapping resonance. In the interval between the pump and detection pulses, an ensemble of atoms is exposed to an auxiliary field of the same spectra, but of much lower intensity. As a result the nearby fringes are suppressed in amplitudes compared to the central one. The experimental results are in good agreement with the theoretical description of the effect made for the three-level model of the atom and based on the solution of the equations for the density matrix.

Долговременную стабильность стандартов частоты с метрологическим резонансом, возникающим благодаря эффекту когерентного пленения населенностей (КПН), ограничивает световой сдвиг [1,2]. Эффективным способом его подавления является метод Рэмси [3]. Сигнал Рэмси формируется импульсным возбуждением и зондированием атомной когерентности на частоте метрологического перехода. Сигнал состоит из множества резонансов с близкими амплитудами в окрестности центрального резонанса [4]. Идентификация центрального резонанса

Рэмси, соответствующего нулевой разности фаз между СВЧ полем и осцилляцией атомной когерентности необходима для стабилизации частоты стандарта. В работе представлен простой метод выделения центрального резонанса Рэмси, который может быть использован для поиска метрологического перехода в стандартах с полностью автономным включением. Метод состоит в использовании слабого оптического поля (по сравнению с полем накачки) между импульсами накачки и детектирования. Вспомогательное поле приводит к разрушению тёмного состояния, сформированного полем накачки, и одновременному формированию новой суперпозиции, являющейся для него тёмным состоянием. Последний процесс имеет резонансный характер в области метрологического резонанса Рэмси. В результате соседние резонансы Рэмси уменьшаются по сравнению с центральным (рис. 1).

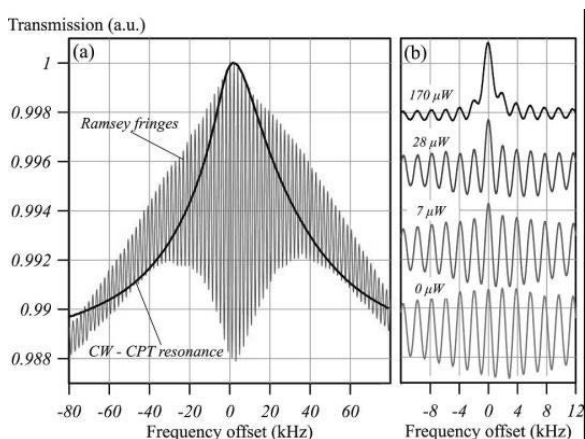


Рис. 1.(a) Резонанс когерентного пленения населенностей в постоянном и импульсном режимах. (b) Эволюция сигнала Рэмси в области центрального резонанса при увеличении интенсивности вспомогательного поля.

Список литературы

- [1] Liew L.-A., Knappe S., Moreland J. et al // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. P. 2694.
- [2] Knappe S., Wynands R., Kitching J. et al // J. Opt. Soc. Am. B. 2001. Vol. 18. P. 1545.
- [3] Hemmer P.R., Shahriar M.S., Natoli V.D. et al // J. Opt. Soc. Am. B. 1989. Vol. 6. P. 1519.
- [4] Liu X., Ivanov E., Yudin V.I. and others // Phys. Rev. Applied. 2017. Vol. 8. P. 054001.

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 имени П.Н.Лебедева Российской Академии Наук, Москва

ГЛУБОКОЕ ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ АТОМОВ ТУЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ SWAP

В данной работе исследуется возможность применения метода SWAP для глубокого охлаждения атомов тулия на узком переходе на длине волны 1.14 мкм. Проведено моделирование атомной системы под действием последовательности пилообразных импульсов и экспериментальная проверка полученных результатов

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

Lebedev Physical Institute of RAS

DEEP COOLING OF THULIUM ATOMS BY SWAP TECHNIQUE

In this work we researched the possibility of thulium atoms deep cooling by Sawtooth Wave Adiabatic Passage technique at a narrow transition at a wavelength of 1.14 μm . The atomic system was simulated under the action of a sequence of saw-tooth pulses. The experimental verification of the results was obtained.

Тулий является редкоземельным элементом с вакансией на внутренней 4f оболочке. Как и другие лантаноиды, такие как эрбий и диспрозий, тулий обладает большим магнитным моментом в основном состоянии и является перспективным объектом для квантовых симуляций. Наша группа работает над получением вырожденного квантового газа атомов тулия, который ещё не был получен. На данный момент нами уже реализовано лазерное охлаждение атомов тулия до температур порядка 10 мкК и осуществлен захват в скрещенную дипольную ловушку на длине волны 1.06 мкм. Для получения Бозе-Эйнштейновского конденсата необходимо на несколько порядков повысить фазовую плотность, что достигается понижением температуры. Общепринятым методом достижения температуры конденсации является испарительное охлаждение. Существенным для этого метода является выбор стартовой температуры: слишком высокая температура в начале охлаждения приведет к слишком малой концентрации атомов в конце, а значит, задача повышения фазовой плотности останется нерешенной. Удобной

стартовой температурой является точка 1мК, и наша текущая задача заключается в ее достижении методами лазерного охлаждения, то есть без уменьшения количества атомов.

Для этого предлагается использовать разработанный в 2017 году метод SWAP (Sawtooth wave adiabatic passage, Адиабатический переход при пилообразном импульсе)[1]. В этом методе реализуется адиабатическое сканирование частоты через резонанс, что позволяет увеличить скорость охлаждения и достичь температур порядка предела отдачи (~100нК) без существенного уменьшения концентрации. Для реализации метода был выбран спектрально узкий переход 1.14 мкм с естественной шириной 1.2 Гц. Это отличает эту работу от ранее проведенных, где ширина линии принимала значения 5-200кГц, что устраняет проблему спонтанного распада на всем протяжении эксперимента.

Была проведена теоретическая оценка необходимых параметров эксперимента, таких как частота и амплитуда сканирования частоты, частоты Раби и времени охлаждения, проведено моделирование численное моделирование населенности атомных уровней и импульса атома в процессе охлаждения и экспериментальная проверка возможности использования этого метода.

Список литературы

[1] M.A.Norcia, J.R.K.Cline, J.P.Bartolotta, M.J.Holland and J.K.Thompson. Narrow-line laser cooling by adiabatic transfer//New Journal of Physics, 20(2): 023021, 2018

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

Физический институт имени П.Н.Лебедева Российской Академии Наук, Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ВНУТРЕННИХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ ТУЛИЯ

В работе рассматривается возможность использования оптической накачки для подготовки состояний атомов тулия с определенной проекцией полного момента. В ходе экспериментов были найдены подходящие переходы, и продемонстрирована эффективная накачка на центральный и крайние магнитные подуровни основного состояния.

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

Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow

OPTICAL PUMPING FOR PREPARATION OF THE INNER STATES OF THULIUM ATOMS

Possibility of optical pumping for thulium atoms is researched in this work. During the experiment suitable transitions were found that allowed us to make an effective optical pumping on certain magnetic levels of the ground state.

Важным аспектом работы с квантовыми системами является подготовка их начальных состояний. Подобные задачи встают как при работе с ионами, так и при работе с ансамблями атомов. В нашей лаборатории проводятся эксперименты с атомами тулия – лантаноида с единственной вакансией на внутренней 4f оболочке, которая значительно экранирована от внешних электрических полей, что делает тулий потенциальным кандидатом для создания оптического стандарта частоты. На данный момент в ФИАНе было проведено лазерное охлаждение атомов тулия до температур порядка 10 мК [1], найден часовой переход между тонкими уровнями основного состояния атома на длине волны 1.14мкм [2] и получена оптическая ловушка на магической длине волны [3]. Для оптических часов используется компонента часового перехода $|mF=0\rangle \rightarrow |mF'=0\rangle$, обладающая рядом преимуществ, как, например, равенства нулю линейного зеемановского сдвига и векторной поляризуемости. Перед нами встанет задача подготовки внутренних состояний исследуемых атомов, одним из

решений которой является оптическая накачка. Эксперименту по реализации накачки на двух различных переходах в атомах тулия посвящена данная работа.

Основная идея оптической накачки заключается в поиске так называемых темных состояний – состояний, однажды попав в которые атом перестает взаимодействовать со светом. Так, в случае перехода между уровнями с $F=F'$, возбуждаемого линейно поляризованным светом, темным является состояние с $mF=0$, и атомы начинают в нем накапливаться. Так как спин ядра тулия $I=1/2$, существует два типа подходящих переходов: $|J=7/2\rangle \rightarrow |J'=J+1=9/2\rangle$ и $|J=7/2\rangle \rightarrow |J'=J=7/2\rangle$.

В качестве первого шага нами была реализована оптическая накачка на переходе первого типа $|J=7/2, F=4\rangle \rightarrow |J'=9/2, F'=4\rangle$ на длине волны 531нм, который используется для лазерного охлаждения. Однако, так как возбужденный уровень с высокой вероятностью распадается на уровень $|F=3\rangle$, необходимо возбуждать переход $|F=3\rangle \rightarrow |F'=4\rangle$ для возврата атомов в цикл накачки, что приводит к их нагреву. Переходы второго типа таким недостатком не обладают.

Оптическая накачка на переходе второго типа на длине волны 419нм была продемонстрирована в скрещенной дипольной ловушке. Оптимальные параметры накачки, такие как интенсивность, отстройка накачивающего излучения, величина магнитного поля и длительность накачки в обоих случаях определялись с помощью численного моделирования и экспериментально. Достигнутая степень поляризации составила 0.79 при накачке на центральный магнитный подуровень и 0.75 при накачке на крайний магнитный подуровень.

Список литературы

- [1] Sukachev D.D., Kalganova E.S., Sokolov A.V., Fedorov S.A., Vishnyakova G.A., Akimov A.V., Kolachevsky N.N., Sorokin V.N. // Quantum Electronics. 2014. Vol.44, № 6, P. 515-520.
- [2] Golovisin A.A., Fedorova E.S., Tregubov D.O., Sukachev D.D., Khabarova K.Yu., Sorokin V.N., Kolachevsky N.N. // 2018 arXiv:1809.02215.
- [3] Kalganova E.S., Golovizin A.A., Shevnin D.O., Tregubov D.O., Khabarova K.Yu., Sorokin V.N., Kolachevsky N.N. //Quantum Electronics 2018, Vol. 48, № 5, P. 415-418.

П.В. БОРИСЮК¹, О.С. ВАСИЛЬЕВ¹, С.П. ДЕРЕВЯШКИН^{1,2},
Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ^{1,2,3}, Ю.Ю. ЛЕБЕДИНСКИЙ^{1,3},
С.С. ПОТЕШИН¹, А.А. СЫСОВЕВ¹, Е.В. ТКАЛЯ¹,
Д.О. ТРЕГУБОВ^{1,2,3}, В.И. ТРОЯН¹, К.Ю. ХАБАРОВА²,
В.П. ЯКОВЛЕВ¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

³ Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, Россия

ИОНЫ ТОРИЯ В ЛИНЕЙНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ

Рассмотрены последние результаты в области работы с ионами тория, захваченными в ионную ловушку Пауля. Описана оригинальная многосекционная ловушка и обоснована возможность ее использования для реализации ядерного стандарта частоты. Проведена характеристика процесса захвата ионов полученным методом лазерной абляции.

P.V. BORISYUK¹, O.S. VASILIEV¹, S.P. DEREVYASHKIN^{1,2},
N.N. KOLACHEVSKY^{1,2,3}, Y.Y. LEBEDINSKY^{1,3}, S.S. POTESHIN¹,
A.A. SYSOEV¹, E.V. TKALYA¹, D.O. TREGUBOV^{1,2,3},
V.I. TROYAN¹, K.Y. KHABAROVA², V.P. YAKOVLEV¹

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

² The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS),
Moscow, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

THORIUM IONS IN THE LINEAR QUADRUPLE TRAP

The recent results of the trapped thorium ions studies are considered. The original multi-sectional Paul trap is described. The possibility of using an ion trap for implementing a nuclear frequency standard is demonstrated. The trapping of ions obtained by laser ablation is described in detail.

В последнее время ведутся активные исследования низколежащего изомерного перехода в ядре изотопа тория-229. В 2016 году было впервые проведено прямое детектирование перехода путем регистрации сигнала внутренней конверсии [1]. В 2017 году было измерено характерное время распада изомерного состояния в нейтральном атоме тория через канал внутренней конверсии [2]. Исследование сверхтонкой структуры электронных уровней ионов Th^{2+} в основном и изомерном состоянии с

различным значением ядерного спина ядра тория-229, позволило вычислить магнитный дипольный и электрический квадрупольный момент ядра ^{229m}Th [3].

Один из наиболее популярных подходов исследования низколежащего изомерного перехода в ядре изотопа тория-229 основывается на работе с ионами тория, захваченными в ионную ловушку.

В данной работе описан процесс загрузки ловушки Пауля ионами тория полученными методом лазерной абляции. Приведены результаты моделирования движения ионного облака под действием потенциалов ловушки.

Получение ионов Th^{3+} осуществляется методом лазерной абляции. В качестве абляционного лазера используется Nd:YAG лазер, работающий в режиме модуляции добротности. Достигнутая плотность мощности на образце составляет $\sim 7 \text{ ГВт/см}^2$, что превышает порог абляции и позволяет получать многократно заряженные ионы (Th II , Th III , Th IV , Th V). Для характеристики источника ионов были измерены масс- и энергоспектры пучка ионов.

Для удержания ионов используется многосекционная квадрупольная ловушка Пауля линейной конфигурации. Захвата ионов осуществляется путем подачи синхронизированных с лазерным импульсом (время синхронизации 1 мкс) “запирающих” потенциалов, обеспечивающих удержание ионов в направлении оси ловушки.

Продemonстрировано удержание ионов в ловушке на временах до десятков минут. Достигнутый результат позволяет дальнейшее проведение спектроскопических исследования ионов тория, захваченных в квадрупольную ловушку.

Список литературы

- [1] B. Seiferle, L.v.d. Wense, M. Laatiaoui, et al // Nature, 2016. Vol 533
- [2] B. Seiferle, L. von der Wense, and P. G. Thirolf // Phys. Rev. Lett. 118, 2017.
- [3] E. Peik, M.V. Okhapkin, P. G. Thirolf, et al // Nature, 2018 Vol 556

С.С. ПОТЕШИН, Н.Н. КОМАР

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЯМАХ

В докладе обсуждается универсальный метод охлаждения ионов в динамически изменяемых потенциальных ямах. Представляются материалы теоретических оценок и моделирования процессов охлаждения в радиочастотных ловушках, предлагаются схемы реализации метода. Предлагаемый метод делает доступными для глубокого охлаждения любые ионы, в том числе молекулярные.

SERGEY S. POTESHIN, NIKITA KOMAR

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

ION COOLING IN DYNAMICALLY VARIABLE POTENTIAL WELLS

The report discusses the universal method of cooling ions in dynamically variable potential wells. The theoretical estimates and modeling of cooling processes are presented, schemes for practical implementing the method are proposed. The implementation of the method makes any ions, including molecular ones, available for the deep cooling.

Задача охлаждения ионов, актуальна для задач спектроскопических исследований переходов в ионах, в том числе для создания сверхточных эталонов времени, измерения фундаментальных констант. Существующие методы охлаждения ионов до температур порядка мК и ниже не универсальны для разных видов ионов и тем более не применимы для охлаждения сложных молекул.

Нами предлагается универсальный метод охлаждения ионов в радиочастотной ионной ловушке путем динамического изменения удерживающей потенциальной ямы. В литературе этот метод обычно называется методом адиабатического охлаждения (АО) [1]. Для осциллирующих систем частиц процесс описывается адиабатическим инвариантом [2], который остается постоянным, если характерное время адиабатического воздействия на систему много меньше периода колебаний частиц. За один цикл АО экспериментально получается добиться 4-5 кратного охлаждения [1]. Предложенный метод отличается от описанных в литературе тем, что предлагается использовать циклическое изменение потенциальной ямы и таким путем можно достигнуть более глубокого охлаждения для отдельных ионов. Необходимая синхронизация фазы движения ионов с периодом изменения потенциальной предлагается осуществить по флуоресценции ионов с

помощью позиционно чувствительных детекторов. Для традиционного адиабатического охлаждения характерно очень медленное изменение потенциальных ям. Нами предлагается также дополнительно рассматривать быстрое изменение. При этом, в пределе процесс потери энергии можно назвать антирезонансным охлаждением. В отличие от других методов охлаждения с обратной связью, в качестве воздействия на частицу, нами предлагается использовать псевдопотенциальное поле ловушки:

$$U_{\text{псевдо}}(r) = \frac{q \cdot V}{4 \cdot Ro^2} (r^2 / Ro^2), \text{ где параметр } q = \frac{4eV_{rf}(t)}{m \cdot \omega^2 \cdot Ro^2}$$

В результате исследований был разработан первичный программный инструментарий для теоретического просчета процессов потери энергии ионов и поиска оптимальных условий процессов охлаждения. Исследовалось влияние скорости изменения амплитуды питающего ВЧ напряжения ловушки на динамику охлаждения.

Сделаны оценки влияния точности определения координат осциллирующих ионов на точность синхронизации модуляции потенциальной ямы к фазам движения ионов. Полученные результаты позволяют перейти к практическому осуществлению метода и в итоге создать универсальный и простой в реализации метод охлаждения ионов в ионной ловушке до температур $\sim$ мК и ниже. Реализация метода делает доступными для охлаждения любые ионы, в том числе молекулярные. Это открывает новые возможности для создания более точных и простых эталонов времени и малогабаритных квантовых компьютеров. Возможность охлаждения молекулярных ионов делает доступным и простым исследование структуры биомолекул и создание аналитических приборов нового класса.

Список литературы

- [1] G.Z. Li, R. Poggiani, G. Testera, G. Werth, Adiabatic cooling of ions in the penning trap // Zeitschrift Für Phys. D Atoms, Mol. Clust. 22 (1991)
- [2] Е.М. Ландау, Л. Д., Лифшиц, «Теоретическая физика», том I, Механика, Наука, 1988.

И.Н. ДРИБАС, А.С. БОРИСЕНКО, И.В. ЗАЛИВАКО, И.А. СЕМЕРИКОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЛАЗЕРНО-ОХЛАЖДЕННЫХ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ В РАДИОЧАСТОТНОЙ ЛОВУШКЕ

Захват ионов в ловушку и их лазерное охлаждение это необходимые шаги при разработке оптических ионных часов, квантовых сенсоров, и других приложениях, где объектами исследования и манипуляций являются ионы. В работе представлены результаты численного моделирования для определения позиций ионов $^{171}\text{Yb}^+$ в линейной ловушке Пауля. Рассчитана динамика лазерно-охлажденных ионов в гармоническом потенциале, а также радиальные и аксиальные частоты колебаний ионного кристалла в ловушке.

I.N. DRIBAS, A.S. BORISENKO, I.V. ZALIVAKO, I.A. SEMERIKOV, K.Y. KHABAROVA, N.N. KOLACHEVSKY
*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

MOTIONAL STATES OF LASER COOLED YB IONS IN A RADIOFREQUENCY TRAP

Efficient cooling of trapped ions is one of the necessary steps in the development of optical ion clocks, quantum sensors and many other applications where ions are the subject of manipulation or research. Numerical simulation was performed to determine individual equilibrium positions of up to ten $^{171}\text{Yb}^+$ in a linear Paul trap. Dynamics of ions in a harmonic potential and radial and axial modes of the ion crystal were calculated.

Одной из проблем при работе с массивами ионов, загруженных в квадрупольную радиочастотную ловушку, является уменьшение расстояния между соседними ионами ионного кристалла по мере приближения к центру ловушки. В случае большого числа ионов, расстояния между ними могут оказаться недостаточными для адресации с помощью лазерного излучения. Разрешить эту проблему может использование ловушки с негармоническим потенциалом [1].

В работе представлен расчет положений ионов $^{171}\text{Yb}^+$ в линейной ловушке с гармоническим и биквадратическим потенциалом, а также расчет частот собственных мод для этих потенциалов.

Положение ионов в ловушке определяется формой приложенного потенциала и кулоновским взаимодействием между ионами. Положение ионов можно определить из выражения:

$$-\left.\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right|_{z=z_i} + e \sum_{j \neq i} \frac{1}{z_i - z_j} = 0, i = 1, \dots, N \quad (1)$$

где N – количество ионов, φ – внешний потенциал.

Используя метод из [2] мы можем также рассчитать частоты поперечных и аксиальных мод. Для рассматриваемой нами конфигурации ловушки уже при числе ионов $N=10$ расстояния между двумя крайними и двумя центральными ионами отличаются почти в два раза.

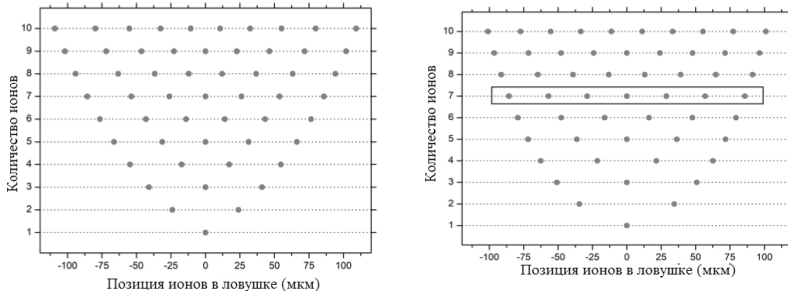


Рис.1 Слева: аналитически рассчитанные позиции ионов $^{171}\text{Yb}^+$ в ловушке с гармоническим потенциалом. Справа: аналитически рассчитанные позиции десяти ионов $^{171}\text{Yb}^+$, захваченные в негармонический потенциал (1), где $\kappa_2 = 4.66 \cdot 10^3 \text{ В/м}^2$ и $\kappa_4 = 3.49 \cdot 10^{12} \text{ В/м}^4$.

В качестве альтернативы, мы рассматриваем биквадратический потенциал, определяемый выражением:

$$\varphi(z) = \kappa_2 z^2 + \kappa_4 z^4(1)$$

На рисунке 1 справа приведен расчет положений ионов для такого потенциала. κ_2 определяет частоту колебаний одиночного иона по оси z :

$$\omega_z = \sqrt{e|\kappa_2|/m}.$$

При использованных значениях κ_2 и κ_4 и цепочки из 7 ионов мы получаем среднее расстояние между ионами 28,6 мкм. При таком же среднем расстоянии в гармоническом потенциале для 7 ионов, расстояния между крайними и центральными ионами составят 32,0 мкм и 26,1 мкм соответственно.

Список литературы

- [1] G.D. Lin, S.L. Zhu, R. Islam, K. Kim, M.S. Chang, S. Korenblit, C. Monroe, L.M. Duan, EPL (2009). URL 10.1209/0295-5075/86/60004
- [2] D.F. James, Applied Physics B: Lasers and Optics (1998). URL 10.1007/s003400050373

Е.Ф. СТЕЛЬМАШЕНКО, В.Н. БАРЫШЕВ, В.А. ТИЩЕНКО, И.Ю.
БЛИНОВ
ФГУП ВНИИФТРИ
Менделеево, Солнечногорский район, Россия

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В АТОМЕ ^{85}Rb

В данной работе представлен принципиально новый способ измерения напряженности электрического поля радиочастотного диапазона, основанный на использовании взаимодействия радиочастотных полей с щелочными атомами, которые возбуждаются до ридберговских состояний. Проведены первые измерения расщепления пика электромагнитно-индуцированной прозрачности и расчеты напряженности электрического поля, в которое помещалась ячейка с атомами Rb.

E.F. STELMASHENKO, V.N. BARYSHEV, V.A. TISHCHENKO,
I.YU. BLINOV
FSUE VNIIFTRI
Mendeleevo, Solnechnogorskii district, Moscow, Russian Federation

FIRST RESULTS OF MEASUREMENTS OF ELECTRIC FIELD STRENGTH BASED ON QUANTUM ENERGY TRANSITIONS IN ATOM ^{85}Rb

This paper presents a fundamentally new method of measuring the electric field strength of the radio frequency range, based on the use of the interaction of radio frequency fields with alkaline atoms excited to Rydberg states. We report first measurements of the splitting of the peak of the electromagnetically induced transparency and the calculations of the electric field strength, in which the cell with the Rb atoms was placed.

Современные методы измерений напряженности электрического поля имеют некоторые недостатки (требуют калибровки и имеют относительно невысокую чувствительность – >100 мВ/м). Использование зондов на основе ридберговских атомов при комнатной температуре является одним из перспективных подходов в решении этих проблем. Данный метод позволяет проводить измерения на частотах от 1 ГГц до 500 ГГц, возможно до 1 ТГц. Щелочные атомы, помещенные в ячейку, оптически возбуждают до ридберговских состояний, и затем используется чувствительность высоколежащих ридберговских уровней к РЧ излучению. Данный метод является самокалибрующимся, т.к. прослеживается к атомным переходам. В работе используется стеклянная

ячейка с парами атомов Rb (смесь ^{85}Rb и ^{87}Rb), которые оптически возбуждаются до ридберговских состояний с помощью двух лазеров: красного (пробного) с длиной волны 780 нм и синего (связывающего) с перестраиваемой длиной волны 479-486 нм. Существенные для данного метода атомные состояния Rb лежат в четырехуровневой атомной системе: $5S_{1/2} - 5P_{3/2} - ND_{5/2} - (N+1)P_{3/2}$.

Используемый в эксперименте фотодетектор регистрирует резонансное поглощение красного света, проходящего через ячейку. При включении синего лазера в спектре появляется окно прозрачности. Данный эффект называется эффектом электромагнитно-индуцированной прозрачности. Для измерения напряженности электрического поля на ячейку дополнительно подается РЧ поле, соответствующее переходу $ND_{5/2} - (N+1)P_{3/2}$. Под действием этого поля пик пропускания расщепляется на два (эффект Ауслера-Таунса), расстояние между которыми зависит не от частоты, а от напряженности электрической составляющей прикладываемого поля.

Для вычисления напряженности электрического поля используется следующее выражение [1,2]:

$$|E| = \frac{\lambda_c}{\lambda_p} \frac{\hbar}{\rho_{rf}} 2\pi \Delta f(1)$$

В работе проводились измерения расщепления Ауслера-Таунса на частоте РЧ генератора 17,04 ГГц (что соответствует переходу $50D_{5/2} - 51P_{3/2}$) при разных уровнях мощности. Длина волны синего лазера настраивалась на 480,13 нм. По формуле (1) рассчитаны значения напряженности электрического поля. Расчеты проведены для ^{85}Rb . Было показано, что чувствительность данного метода составляет менее 100 мВ/м.

Список литературы

- [1] C.L. Holloway, J.A. Gordon, A. Schwarzkopf, D.A. Anderson, S.A. Miller, N. Thaicharoen, and G. Raithel, "Broadband Rydberg atom-based electric-field probe for SI-traceable, self-calibrated measurements"// IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 62, no. 12, 6169-6182, 2014.
- [2] J.A. Sedlacek, A. Schwettmann, H. Kubler, R. Low, Y. Pfau and J.P. Shaffer, "Microwave electrometry with Rydberg atoms in vapor cell using bright atomic resonances"//Nature Phys., 8, 819, 2012.

Е.А. ЦЫГАНКОВ¹, С.А. ЗИБРОВ¹, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ¹, С.В. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ², А.С. ПОЛЯКОВ³, В.П. ЯКОВЛЕВ³

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

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

УСИЛЕНИЕ УЕДИНЕННОГО МАГНИТООПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В МОДУЛИРОВАННОМ РАДИОЧАСТОТНОМ ПОЛЕ

В работе исследуется отклик на удвоенной частоте ω_{rf} радиочастотного поля в коэффициенте поглощения лазерной волны атомами ^{87}Rb в ячейке с антирелаксационным покрытием, находящейся в достаточно сильном магнитном поле $\vec{B}$. Теоретически и экспериментально продемонстрирован эффект многократного увеличения амплитуды магнитооптического резонанса на уединенном двухквантовом переходе $|F_g, m_{F_g} = -1\rangle \leftrightarrow |F_g, m_{F_g} = 1\rangle$. Он обеспечивается фазовой модуляцией радиочастотного поля с частотой модуляции ω_m , близкой к величине квадратичного зеемановского сдвига ω_{B^2} .

Е.А. TSYGANKOV,¹ S.A. ZIBROV,¹ M.I. VASKOVSKAYA,¹ S.V. PETROPAVLOVSKY,² A.S. POLYAKOV,³ V.P. YAKOVLEV³

¹ Lebedev Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

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

ENHANCEMENT OF A SOLITARY MAGNETO-OPTICAL RESONANCE IN A MODULATED RADIOFREQUENCY FIELD

The work is devoted to a study of the response at the double frequency ω_{rf} of the radiofrequency field in the absorption coefficient of a laser wave by ^{87}Rb atoms in a cell with anti-relaxation coating located in a sufficiently strong magnetic field $\vec{B}$. A new effect of amplitude increasing of the magneto-optical resonance at a solitary two-quantum transition $|F_g, m_{F_g} = -1\rangle \leftrightarrow |F_g, m_{F_g} = 1\rangle$ is demonstrated theoretically and experimentally. It is achieved by the phase modulation of the radiofrequency field with the modulation frequency ω_m close to the value of the quadratic Zeeman shift ω_{B^2} .

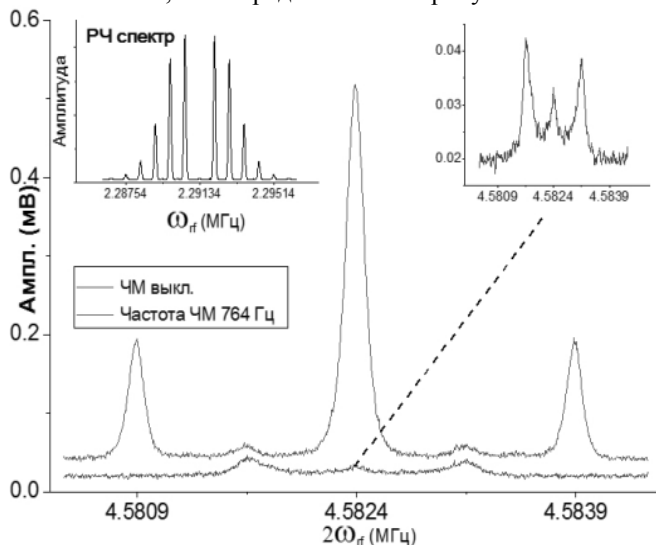
Структура магнитного резонанса в атомах ^{87}Rb на указанном двухквантовом переходе, который может быть использован в квантовых магнитометрах с оптической накачкой, была исследована в работе [1].

Этот резонанс слабо подвержен ориентационному сдвигу, симметричен и имеет выраженную трехпиковую структуру, если величина ω_B^2 превышает его характерную ширину Γ .

В работе исследуется эффект увеличения амплитуды центрального пика резонанса возникающий при модуляции радиочастотного поля по закону $B_{rf}(t) = B_{rf} \cos(\omega_{rf}t + a \sin(\omega_m t))$. В достаточно сильном магнитном поле амплитуда резонанса A имеет вид

$$A \propto \left(\frac{g\mu_B B_{rf}}{2\hbar} \right)^2 \frac{J_1^2(a)}{\delta + i\Gamma/2} \left(\frac{1}{\delta + \omega_m - \omega_{B^2} + i\Gamma} + \frac{1}{\delta - \omega_m + \omega_{B^2} + i\Gamma} \right),$$

где $\delta = \omega_{rf} - \omega_B$ зависит от величины линейного зеемановского сдвига ω_B , $J_1(a)$ – функция Бесселя. Величина A превышает амплитуду резонанса для радиочастотного поля без дополнительной фазовой модуляции по параметру ω_B^2/Γ^2 . Экспериментальное подтверждение эффекта в атомах ^{87}Rb в магнитном поле 3,27 Гс представлено на рисунке.



Здесь нижняя кривая соответствует резонансу в гармоническом поле, верхняя – резонансу в модулированном поле, $\omega_m = 764$ Гц.

Список литературы

- [1] Kozlov A.N., Zibrov S.A., Zibrov A.A. and others // JETP. 2016. Vol. 122, № 5, P. 823–831.

В.Я. ШИФРИН, А.Е. ШИЛОВ, Д.И. БЕЛЯКОВ, Д.Д. КОСЕНКОВ
ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева", Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВОГО ЦЕЗИЕВОГО МАГНИТОМЕТРА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ОБЛАСТЬ «СРЕДНИХ» МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В докладе описывается разработанный во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» квантовый цезиевый атомно-резонансный магнитометр, работающий на разрешённой структуре атомов цезия, и предназначенный для расширения диапазона воспроизведения и передачи магнитной индукции постоянного поля государственного первичного эталона ГЭТ12-2011 в область «средних» полей. Приводятся результаты исследований, направленных на уменьшение погрешности измерений.

V.YA. SHIFRIN, A.E. SHILOV, D.I. BELYAKOV, D.D. KOSENKOV
D.I.Mendeleyev Institute for Metrology VNIIM, St.Petersburg, Russia

USE OF THE QUANTUM CAESIUM MAGNETOMETER FOR EXPANSION OF RANGE OF THE STATE PRIMARY STANDARD TO THE AREA OF "AVERAGE" FIELDS

In the report the quantum cesium atomic resonant magnetometer developed in D.I.Mendeleyev Institute for Metrology and working at the resolved structure of atoms of cesium and intended for expansion of range of reproduction and transfer of magnetic induction of the constant field of the state primary standard of GET12-2011 to area of "average" fields is described. Results of the researches directed to reduction of an error of the device are given.

Существующая эталонная база магнитных измерений РФ не охватывает метрологическое обеспечение диапазона измерений магнитной индукции (МИ) «средних» и «сильных» полей (диапазон 1 мТл-1Тл). Диапазон воспроизводимой государственным первичным эталоном базовых единиц магнитных величин в области измерений единицы магнитной индукции ограничен пределами $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$ Тл. Сложности при передаче размера единицы Тл от ГЭТ12-2011 в область «средних» полей ($1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ Тл) возникает из-за принципиальных ограничений, связанных с несогласованностью диапазонов измерений при применении существующих квантовых методов измерений на основе атомного и ядерного магнитных резонансов (АМР и ЯМР).

Для решения этой проблемы во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» был разработан, создан и исследован квантовый цезиевый атомно-резонансный магнитометр (КЦМ), работающий на разрешённой структуре атомов цезия. Работа КЦМ основана на методе двойного радиооптического магнитного резонанса (АМР). Основным отличием КЦМ от традиционных квантовых цезиевых магнитометров геомагнитного диапазона (20 – 100) мкТл, является его назначение для измерений в 10 – 250 раз больших величин МИ (1 – 25 мТл) при существенно большей абсолютной неоднородности МИ и существенно уменьшенном размере датчика.

В процессе работы были исследованы параметры, в наибольшей степени влияющие на неопределённость измерений частоты АМР с применением КЦМ:

- интенсивность света оптической накачки атомов, которую контролировали по силе тока фотодетектора. Установлено оптимальное значение силы тока 50 мкА, поддерживаемого с нестабильностью менее $\pm 0,01$ мкА. Определена степень влияния интенсивности света оптической накачки атомов на показания прибора, составляющая менее $1 \cdot 10^{-7}$ при вариациях силы тока $\pm 2,5$ мкА;
- оптимальная (по интенсивности сигнала АМР) температура в объёме чувствительного элемента, установленная на уровне 61 °С. Температура автоматически поддерживается с погрешностью менее 0,05°С;
- вариации амплитуды переменной МИ резонансной частоты «радиополя» (РП) и его модуляции (М) практически не влияют на нестабильность частоты АМР (на уровне $1 \cdot 10^{-7}$) при изменении амплитуд РП и М в пределах ± 50 % от оптимальных величин, при том, что имеющаяся система генерации «радиополя» обеспечивает его стабильность в пределах $\pm 0,3$ %.

Зависимость измеряемой индукции B от частоты АМР f определяется полиномиальной функцией пятого порядка:

$$B = K_1 \cdot f + K_2 \cdot f^2 + K_3 \cdot f^3 + K_4 \cdot f^4 + K_5 \cdot f^5$$

Коэффициенты полинома (K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5) были получены экспериментально на основании сличения КЦМ с эталонным щелочно-гелиевым магнитометром из состава ГЭТ12-2011 в диапазоне 0,8-2 мТл и с разработанным ЯМР тесламетром в диапазоне 1 – 25 мТл.

По экспериментальной оценке, случайная составляющая погрешности измерений частоты АМР с помощью КЦМ, не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ во всём диапазоне 1–25 мТл.

Список литературы

[1] Д.И.Беляков, В.Н.Хорев, А.Е.Шилов, В.Я.Шифрин// Измерительная техника, 2017, № 12, стр. 28 – 31

У.Н. КУРЕЛЬЧУК, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ НАНОКЛАСТЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследованы электронные и термоэлектрические свойства структур, состоящих из наиболее устойчивых конфигураций нанокластеров Au, Ag, Pt, Pd, Ta размером до 1 нм и свыше 1 нм. Для модельных структур исследована взаимосвязь термо-ЭДС, особенностей электронной структуры и геометрических факторов: материала, размеров нанокластеров, плотности их упаковки, температуры. Установлены характеристики, наиболее подходящие для создания термоэлектрических материалов с повышенной добротностью, рассчитаны их термоЭДС.

U.N. KUREKCHUK, P.V. BORISUYK, O.S. VASILYEV

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

ELECTRONIC AND THERMOELECTRIC PROPERTIES OF THE MODEL NANOCLUSTERED MATERIALS

The electronic and thermoelectric properties of structures consisting of the most stable configurations of Au, Ag, Pt, Pd, Ta nanoclusters with a size of up to 1 nm and above 1 nm have been studied. Interrelation of thermopower, electronic structure and geometrical factors (metal and size of nanoclusters, density of their packing, temperature) have been considered. The most suitable characteristics for creating thermoelectric materials with high quality are established, their thermopower is calculated.

В работе представлены результаты моделирования и первопринципных расчетов электронных и термоэлектрических характеристик макроскопических материалов состоящих из нанокластеров наиболее устойчивой конфигурации размерами до 1 нм и свыше 1 нм. Согласно экспериментальным исследованиям, размер 1 нм является переходным между проводящим и полупроводниковым состоянием для отдельных нанокластеров металлов [1]. Из экспериментов следует, что нанокластеры благородных металлов $d \sim 0.5$ нм и $d \sim 2-3$ нм самоорганизуются в кубические, ГЦК или ОЦК решетки в зависимости от среды и размера, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия свидетельствует о довольно плотном расположении отдельных нанокластеров в суперрешетках, так что расстояние между ними меньше их радиуса, однако при этом форма и автономность частиц сохраняются [2-3].

Методом теории функционала плотности были смоделированы и исследованы простые сверхрешетки с кубической, ОЦК и ГЦК симметрией, состоящие из нанокластеров Me_{13-55} , где $Me=Au, Ag, Pt, Pd, Ta$. Выявлено, что повышенными значениями термоЭДС обладают решетки с большей степенью разупорядоченности и меньшей плотностью упаковки отдельных НК, причем наиболее устойчивых НК $d \sim 0.5$ нм. Отношение расчетных термо-ЭДС нанокластерных решеток S_{nano} к термо-ЭДС обычного металла S_{bulk} при температурах 200-500 К составляет: Ag 40-48, Au 25-32, Ta 15-17, Pd 4, Pt 2-6. При этом абсолютные значения максимальны для нанокластерных Au ~ 100 мкВ/К, и минимальны для Pt ~ 8 мкВ/К при $T=500$ К. При этом, несмотря на рост S_{nano} с повышением температуры, для благородных металлов S_{nano}/S_{bulk} немного снижается, а для наноструктур Ta остается стабильным. Учитывая при этом, что Ta и его нанокластеры являются наиболее тугоплавкими и доступными из рассмотренных, наноструктурированные материалы из Ta также можно считать перспективными для получения высокоэффективных термоэлектрических материалов. Детальное исследование температурных диапазонов генерации и стабильности указанных наноструктур требует дальнейшего экспериментального изучения.

Список литературы

- [1] Martin James E. // Journal of Physical Chemistry B. - 10.1021/jp0139944 (2012)
- [2] Wang Zhijiang et al. // Journal of Materials Chemistry, 10.1039/c2jm15103k (2012)
- [3] Schmitt, Julien et al. // Journal of Physical Chemistry B. 10.1021/acs.jpcc.6b03287 (2016)

П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ, Ю.Ю. ЛЕБЕДИНСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОКЛАСТЕРНЫЕ ПЛЕНКИ С ГРАДИЕНТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАНОКЛАСТЕРОВ ПО РАЗМЕРАМ КАК НОВЫЙ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В работе рассматривается идея использования размерноупорядоченных нанокластерных пленок как фотовольтаического материала с широким спектром поглощения, включающий ближний инфракрасный диапазон. Рассмотрены методики формирования подобных структур, приведены результаты экспериментальной реализации, исследования химического состава, морфологии поверхности тонких пленок Co, Ta, Mo и Ni, состоящих из нанокластеров металлов, сформированных на поверхности оксида кремния $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$, методом магнетронного осаждения из газовой фазы. Представлены результаты исследования спектров поглощения полученных структур и предварительные результаты по возникновению фотоэлектродвижущей силы при облучении сформированных пленок внешним излучением.

P.V. BORISYUK, O.S. VASILYEV, YU. YU. LEBEDINSKII
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia*

METAL NANOCLUSTER FILMS WITH GRADIENT SIZE DISTRIBUTION OF THE NANOCLUSTER SIZE AS A NEW PHOTOVOLTAIC MATERIAL

The work deals with the idea of using size-ordered nanocluster films as a photovoltaic material with wide spectrum of absorption, including the near infrared range. The methods of formation of such structures are considered, the results of experimental realization, research of chemical composition, morphology of the surface of Co, Ta, Mo and Ni thin films, consisting of metal nanoclusters formed on the surface of silicon oxide $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ by magnetron deposition from the gas phase are presented. The results of the study of the absorption spectra of the obtained structures and preliminary results on the appearance of the photovoltaic electromotive force under irradiation of the formed films by external radiation are presented.

На текущий момент задача повышения эффективности фотоэлементов и солнечных элементов питания в целом представляет значительный научный и практический интерес в виду активного развития солнечной энергетики как имеющей наименьшую экологическую нагрузку. Однако, низкая эффективность вкупе с высокой стоимостью существующих фотоэлектрических преобразователей ставит задачи по поиску новых фото-

вольтаических материалов. В рамках данного исследования для решения данной проблемы предлагается исследовать уникальную систему на основе градиентных квадизвумерных металлических нанокластерных пленок. Данная система относительно проста для экспериментальной реализации и представляет собой тонкие пленки, состоящие из нанокластеров металлов различного размера, в которых имеется выделенное направление, вдоль которого размер нанокластеров монотонно меняется. Поскольку вследствие размерного изменения объемных и поверхностных вкладов в плотность электронных состояний наночастиц, энергия Ферми частиц нанометровых размеров меняется с размером, в системе с градиентным изменением размеров наночастиц будет возникать градиент химического потенциала и перераспределение заряда в целом. Возникающие при облучении данной системы светом фотоэлектроны будут чувствовать наличие данного потенциала и будут стекать в направлении градиента потенциала, вызванного пространственным упорядочением нанокластеров по размерам. Поскольку нанокластеры - металлические, это в общем случае обеспечивает возможность детектирования фотонов различной длины волны и, следовательно, обеспечивает широкий спектр поглощения излучения предлагаемой системы, а наличие электрического контакта между нанокластерами обеспечивает сохранение электронной проводимости в такой системе за счет туннелирования электронов между нанокластерами и перколяционных эффектов.

В работе были сформированы тонкопленочные металлические образцы Ta, Mo, Ni, Co, на поверхности $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$, используя кластерный источник Nanogen-50 с квадрупольным масс-спектрометром MesoQ (Mantis Deposition Ltd., Великобритания), интегрированный в сверхвысоковакуумную систему анализа поверхности Multiprobe MXPS VT AFM (Omicron NanoTechnology GmbH, Германия). Контроль химического состава и электронной структуры нанокластерных был осуществлен *in situ* методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Представлены результаты исследования спектров поглощения полученных структур и предварительные результаты по возникновению фотоэлектродвижущей силы при облучении сформированных пленок внешним излучением.

А.Д. ЛЕВИН, М.К. АЛЕНИЧЕВ, А.Ю. САДАГОВ, С.В. ДЕЖУ-
РОВ, Д.В. КРЫЛЬСКИЙ, О.А. БАРАНОВА, А.В. ЧЕКАНОВ, А.А.
ЮШИНА

ФГУП «ВНИИ оптико-физических измерений» - Москва, Россия

ФГУП «НИИ прикладной акустики» - Дубна, Россия

Российский национальный исследовательский медицинский университет
им. Пирогова - Москва, Россия

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ НАНОСЕНСОРЫ НА КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Принцип действия наносенсоров основан на изменении флуоресцентного отклика коллоидных квантовых точек CdSe/ZnS в результате взаимодействия с аналитом в растворе. Экспериментально исследованы два альтернативных подхода, один из которых основан на эффекте фёрстеровской резонансной передачи энергии (FRET), а другой - на восстановлении флуоресценции, «выключенной» молекулой-акцептором.

A.D. LEVIN, M.K. ALINICHEV, A.YU. SADAGOV,

S.V.DEZHUROV, D.V. KRYLSKY,

O.A. BARANOVA, A.V. CHEKANOV, A.A. YUSHINA

*All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements – Moscow,
Russia*

Applied Acoustics Research Institute, Dubna, Russia

Pirogov Russian National Research Medical University – Moscow, Russia

FLUORESCENT NANOSCENCORS BASED ON COLLOIDAL QUANTUM DOTS

The concept of nanosensors is based on the change in the fluorescent response of colloidal quantum dots CdSe/ZnS as a result of interaction with the analyte in solution. Two alternative approaches have been experimentally investigated, one of which is based on the effect of Froester resonant energy transfer (FRET), and the other on the restoration of fluorescence, which is turned off by the acceptor molecule.

Уникальные оптические свойства коллоидных квантовых точек (КТ) дают возможность создания на их основе наносенсоров для определения в биологических жидкостях веществ, представляющих интерес для медицинской диагностики. Одной из особенностей КТ является их способность передавать энергию возбуждения флуоресценции молекулам или частицам акцепторам. Если акцептор не обладает флуоресцентными свойствами, это приводит к полному или частичному

выключению флуоресценции КТ. Если же акцептор сам является флуорофором, то происходит так называемая Фростеровская резонансная передача энергии (FRET), когда флуоресценция КТ уменьшается, а флуоресценция акцептора возрастает [1].

Работа наносенсора определяется взаимодействиями в системе КТ-аналит-акцептор. Аналит либо связывает КТ с акцептором, либо, наоборот, ослабляет эту связь. Оба варианта были реализованы в прототипах наносенсора для определения восстановленного глутатиона. Глутатион представляет собой низкомолекулярное небелковое соединение, концентрация которого в плазме крови представляет интерес при диагностике ряда серьезных заболеваний. В наносенсоре на основе FRET в качестве донора используются КТ CdSe/ZnS, модифицированные 3-меркаптопропионовой кислотой (МПА), а в качестве акцептора – флуоресцентный краситель оксазин 170. Присутствие в системе восстановленного глутатиона снижает эффективность FRET за счет взаимодействия глутатиона с МПА, что приводит к характерным изменениям отношения интенсивностей флуоресценции донора и акцептора. Другой вариант наносенсора использует в качестве донора те же модифицированные КТ, а в качестве акцептора ионы метил-виологена, забирающие энергию возбуждения КТ на близком расстоянии, выключая, таким образом, ее флуоресценцию. При появлении в растворе молекул аналита они связываются с молекулами МПА, в результате чего нарушается закрепление этих молекул вблизи КТ, флуоресценция последних восстанавливается, при этом интенсивность флуоресценции оказывается пропорциональной концентрации глутатиона в интервале от 200 до 1000 мкМ. Было разработано также портативное детектирующее устройство для флуоресцентных наносенсоров, поддерживающее как измерение интенсивности эмиссии при фиксированной длине волны, так и отношения интенсивностей на двух длинах волн (рационаметрический режим, необходимый для FRET). Возбуждение флуоресценции в обоих случаях осуществляется диодным лазером.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках прикладного научного исследования (уникальный идентификатор RFMEFI62417X0045). Соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. № 14.624.21.0045.

Список литературы

[1] Niko Hildebrandt et al Energy Transfer with Semiconductor Quantum Dot Bioconjugates: A Versatile Platform for Biosensing, Energy Harvesting, and Other Developing Applications// Chemical Review, 2017, V.117, P.P.536-711.

К.С. КРАВЧУК, В.Н. РЕШЕТОВ, А.А. РУСАКОВ,
В.В. СОЛОВЬЁВ, А.С. УСЕИНОВ
ФГБНУ ТИСЧУМ, Троицк, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ КОНФОКАЛЬНЫХ ХРОМАТИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ И ГЕОМЕТРИИ МАКРООБЪЕКТОВ

Рассмотрена область применения конфокальных хроматических датчиков поверхности для измерения геометрии макрообъектов. Проведено сравнение профилей поверхности, измеренных конфокальным хроматическим зондом, профилометром и механическим контактным контурографом. Проведена оценка точности, скорости и геометрических ограничений формы образцов для конфокальных профилометров. Продемонстрирована возможность как микро, так и макроизмерений с использованием хроматических конфокальных зондов с латеральным разрешением лучше 10 мкм и вертикальным разрешением лучше 10 нм.

K.S. KRAVCHUK, V.N. RESHETOV, A.A. RUSAKOV,
V.V. SOLOV'EV, A.S. USEINOV
FSBI TISNCM, Troitsk, Moscow, Russia

APPLICATION OF CONFOCAL CHROMATIC SENSORS FOR THE STUDY OF ROUGHNESS AND GEOMETRY OF MACRO OBJECTS

The field of application of confocal chromatic surface sensors for measuring the geometry of macro-objects is considered. A comparison was made of the surface profiles measured by a confocal chromatic sensor, a profilometer and a mechanical contact contour measuring machine. The accuracy and speed of measurement, geometric limitations of the sample shape for confocal profilometers have been evaluated. The possibility of micro and macro measurements using chromatic confocal sensors with lateral resolution better than 10 microns and vertical resolution better than 10 nm is demonstrated.

Конфокальные методы исследования формы поверхности раздела двух сред, отличавшихся по своим оптическим свойствам, сегодня широко применяются в самых разных областях науки и техники. Оптические 3D микроскопы успешно конкурируют с атомно силовыми и оптическими микроскопами при исследовании биологических объектов. В последние годы все большую популярность набирают волоконно-оптические конфокальные хроматические датчики поверхностей раздела (Рис. 1).

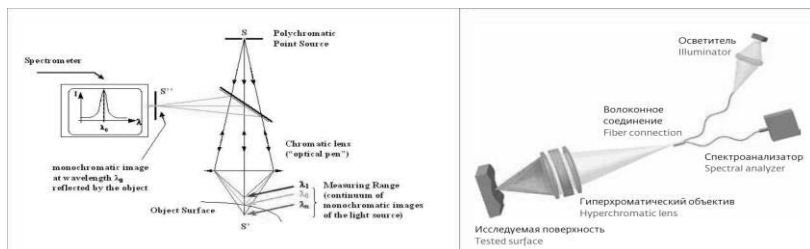


Рис. 1. Схема устройства некоторых конфокальных хроматических зондов

В данных приборах удалось совместить конфокальный хроматический принцип контроля поверхности с волоконно-оптическим способом доставки зондирующего излучения в выносной модуль. В представленной работе проведено сравнение такого рода зондов с традиционными контактными приборами, измеряющими форму и шероховатость поверхности и показано, что для большинства задач, решаемых механическими профилометрами и контурографами, механический щуп может быть полноценно заменен на конфокальный хроматический зонд. Пример измерения формы поверхности стандартной меры шероховатости с R_a 2300 нм и R_a 150 нм представлены на рисунке 2. Решётка T1.01.04 (R_a 2300 нм), шаг 100 мкм. Решётка T1.02.03 (R_a 150 нм), шаг 100 мкм.

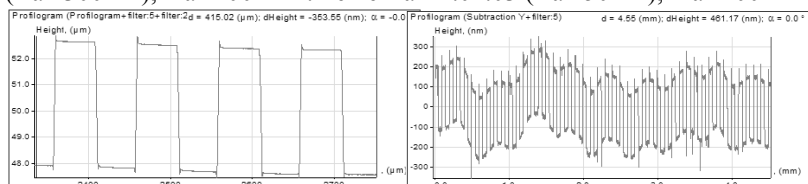


Рис. 2. Профиль поверхности стандартной меры шероховатости ПРО-10 с R_a 2300 нм и R_a 150 нм

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0274 (ЭБ №075-15-2019-024, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0274).

Список литературы

- [1] Operating and maintenance manual www.stilsa.com.
- [2] Моделирование и расчет гиперхроматических объективов для волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования М.А.Завьялова, П.С.Завьялов, Photonics № 5 / 65 / 2017.

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

M.A. SALEM^{1,2}, K.P. KATIN¹, M.M. MASLOV¹

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

²*Department of Physics, Faculty of Science, Zagazig University, 44519 Zagazig, Egypt*

ELECTRONIC STRUCTURES OF SILICON AND NITROGEN DOPED FULLERENES: DENSITY FUNCTIONAL CALCULATIONS

Nitrogen and silicon doping of carbon fullerenes provides the possibility for the modification of their reactivity and electronic properties. Both Si and N atoms can replace the carbon atoms in a fullerene cage without perceptible structural deformations of the latter. Nitrogen and silicon substituents provide *n*-doping of fullerenes and therefore result in significantly change of their electronic characteristics.

In our study, all density functional calculations were done at the all electron level using Becke's three-parameter hybrid method and the Lee-Yang-Parr exchange-correlation energy functional (B3LYP). The 6-311G(d) electron basis set was used to optimize the geometries and to obtain the structures, energies and HOMO-LUMO gaps of the silicon and nitrogen doped fullerenes, which are promising materials for nanoelectronic devices [1]. The density functional theory (DFT) has been shown to be a basic method for the analysis of the properties of low-dimensional carbon nanostructures with highly strained frameworks [2]. All DFT calculations were performed using the GAMESS program package.

As the smallest example of Si- and N-doped fullerene, we consider the C₁₈NSi dodecahedral cage. The binding energies of different C₁₈NSi isomers were calculated by the equation [3]

$$E_b \left[\frac{\text{eV}}{\text{atom}} \right] = \frac{1}{N_{at}} [E(N) + E(\text{Si}) + 18 * E(\text{C}) - E_{tot}(\text{C}_{18}\text{NSi})],$$

One of the isomers of C₁₈NSi is presented in Fig. 1. In other isomers, the Si atom are placed in another site (labeled as 2, 3, 4 or 5). So, only five different relative positions of substituting Si and N atoms are possible.

Calculated binding energies as well as HOMO-LUMO gaps for five C₁₈NSi isomers are presented at Table 1. Note, that obtained HOMO-LUMO gap for N-doped cage is in good agreement with previously published value [4]. As evidence from Table 1, both nitrogen and silicon atoms significantly reduce HOMO-LUMO gap of pristine fullerene cage. Relative position of dopants also

influences on the system's HOMO-LUMO gap. It can be said that the HOMO-LUMO gap shows the oscillatory behavior depending on the distance between substituting atoms. Isomer 2, in which N and Si atoms are in non-neighboring positions of the same pentagon ring, possesses the highest binding energy and almost the highest HOMO-LUMO gap (see Table 1).

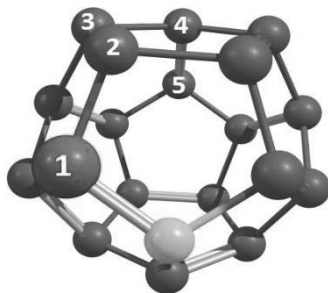


Fig. 1. Molecular structure of one of the $C_{18}NSi$ isomer. Five positions of Si atom relative to N atoms are labeled as 1, 2, 3, 4 and 5. Grey, violet and orange circles represent carbon, silicon and nitrogen atoms, respectively.

Table 1. Binding energies (eV/atom) and HOMO-LUMO gaps (eV) of C_{20} dodecahedral cage and its derivatives doped by silicon and nitrogen atoms.

Structure	E_b	$E_{HOMO-LUMO}$
C_{20}	6.10	1.93
$C_{19}N$	5.98	0.88
$C_{19}Si$	6.00	2.24
$C_{18}NSi$ iso 1	5.90	1.36
$C_{18}NSi$ iso 2	5.85	1.30
$C_{18}NSi$ iso 3	5.86	1.16
$C_{18}NSi$ iso 4	5.86	1.76
$C_{18}NSi$ iso 5	5.86	0.93

The reported study was financially supported by a Grant of the President of the Russian Federation, Grant No. MK-4040.2018.2.

References

- [1] X. Zhong, R. et al. // The Journal of Physical Chemistry Letters Vol. 1 2010 P.1584-1589.
- [2] M.A. Salem // Chemical Physics Vol. 518 2019 P.25-29.
- [3] K.P. Katin, M.M. Maslov // Journal of Physics and Chemistry of Solids Vol. 108 2017 P.82-87.
- [4] K.P. Katin, M.M. Maslov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures Vol. 96 2018 P.6-10.

Д.А. АБИН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ,
И.В. АНИЩЕНКО, А.С. СТАРИКОВСКИЙ,
А.И. ПОДЛИВАЕВ, И.А. РУДНЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия*

ПРОТОТИП ЛЕВИТАЦИОННОГО ПОДШИПНИКА С ВНУТРЕННИМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ СТАТОРОМ

Предложена и реализована конструкция сверхпроводящего пассивного магнитного левитационного подшипника на основе гибких ВТСП лент. Подшипник состоит из цилиндрического статора со сверхпроводящей обмоткой и концентрически вращающегося ротора. Реализованы различные конфигурации расположения постоянных магнитов (ПМ) ротора. Измерены величины горизонтальной и вертикальной составляющей силы левитации и скорости затухания вращения подшипника в зависимости от количества и конфигурации постоянных магнитов.

D.A. ABIN, S.V. POKROVSKII, M.A. OSIPOV,
I.V. ANISCHENKO, A.S. STARIKOVSKI, A.I. PODLIVAEV,
I.A. RUDNEV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

PROTOTYPE OF LEVITATION BEARING WITH INTERNAL SUPERCONDUCTING STATOR

A design of a superconducting passive magnetic levitation bearing on the base of HTSC flexible tapes was proposed and implemented. The bearing consists of a cylindrical stator with a superconducting winding and a concentric rotor. Various arrangements of the permanent magnets (PM) of the rotor were implemented. The values of the horizontal and vertical components of the levitation force and the damping rate of the rotation of the bearing were measured depending on the number and arrangement of the permanent magnets.

Магнитные подшипники применяются в электротехнике в качестве элементов механически бесконтактной опоры или магнитного подвеса. Такие магнитные опоры широко используются для поддержания валов и осей турбин, роторов, маховиков. В данной работе предложена концепция сверхпроводящего пассивного магнитного левитационного подшипника. Устойчивая левитация достигается за счёт охлаждения сверхпроводящей

обмотки статора во внешнем магнитном поле ротора. Одновременно осуществляется и осевая, и радиальная стабилизация ротора.

При конструировании подшипника использовались неодимовые магниты размерами $10 \times 10 \times 10$ мм. Материал магнитов N42, сила сцепления 4,56 кг. В роторе подшипника магниты уложены в 3 слоя по 16 магнитов в каждом с расстоянием между слоями 2 мм. Слои расположены один под другим. Внутри слоя магниты расположены вдоль окружности, центром которой является ось подшипника. Рёбра граней, расположенных ближе к оси, соприкасаются у соседних магнитов. В центральном слое вектор намагниченности всех магнитов направлен вдоль радиуса к оси подшипника. В верхнем и нижнем – от оси.

Статор подшипника представляет собой медную трубу, на которой один под другим намотаны 3 куска сверхпроводящей ленты в 10 слоёв каждый. Использовалась омеднённая лента производства фирмы Супер-Окс шириной 12 мм. Охлаждение статора осуществляется жидким азотом через внутреннюю поверхность медной трубы. Расстояние между внешними витками и слоями магнитов в подшипнике равно 1,7 мм. Большую часть данного зазора занимает термоизоляция.

Рабочей для данного подшипника является конфигурация, при которой центральная плоскость каждого слоя магнитов совпадает с центральной плоскостью соответствующей обмотки сверхпроводящей ленты, а ось симметрии ротора совпадает с осью симметрии статора. Причём сначала ротор необходимо зафиксировать в данной конфигурации, а затем залить в полость медной трубы жидкий азот. С целью однозначного позиционирования ротора до охлаждения, сконструирована специальная поддерживающая система, которая является частью статора. После охлаждения поддерживающая система опускается, освобождая ротор.

Конструкция подшипника также обладает хорошей масштабируемостью. Благодаря модульной конструкции ротора возможно добавление дополнительных слоёв магнитов. А конструкция статора позволяет легко добавлять дополнительные обмотки сверхпроводящей ленты.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 17-19-01527).

Ю.В. АГРАФОНОВ, И.С. ПЕТРУШИН
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

АМОРФИЗАЦИЯ ЖИДКОСТИ (РАСПЛАВА) СО СФЕРИЧЕСКИМИ ПОТЕНЦИАЛАМИ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Рассматривается возможность применения модели жидкости, граничащей с твердой поверхностью для описания микроструктуры тонких аморфных пленок.

Yu.V. AGRAFONOV, I.S. PETRUSHIN
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

AMORTIZATION OF LIQUID (MELT) WITH SPHERICAL POTENTIALS OF INTERMOLECULAR INTERACTION

The possibility of using a model of a liquid bordering a solid surface to describe the microstructure of thin amorphous films is considered.

Современные методы получения аморфных функциональных материалов основаны на методе, при котором расплав подается на быстро вращающийся диск-холодильник. Если скорость охлаждения высока, то кристаллизация подавляется и формируется аморфное состояние. Примером таких неравновесных состояний служат аморфные металлические ленты (АМЛ). Теплофизические характеристики АМЛ, такие как теплоёмкость, скорость звука, микропрочность, зависят от микроскопической структуры (ближнего порядка). Ближний порядок в расположении частиц АМЛ схож с ближним порядком расплавов, поэтому методы равновесной статистической физики (молекулярной динамики и интегральных уравнений для частичных функций распределения) с определенными оговорками применяются для описания аморфизации макроскопических расплавов [1-6].

Более сложная ситуация наблюдается в тонких пленках атомарной толщины. Одной из основных характеристик является поверхностное натяжение, величина которого зависит от потенциала межмолекулярного взаимодействия и потенциала взаимодействия частицы с поверхностью. Эти же потенциалы определяют и ближний порядок - локальное упорядочение в системе взаимодействующих частиц заданной плотности. Ближний порядок описывается двухчастичной функцией распределения (ДФР), которую мы определяем на основе модели жидкости, граничащей с твер-

дой поверхностью [7]. ДФР зависит от расстояния между частицами и удаления каждой из частиц от поверхности. Мы ограничиваемся разложением функций распределения граничных слоев в ряд по степеням плотности в младших порядках теории возмущений. Интегрирование проводится в системе центра масс, что позволяет провести разделение переменных и существенно уменьшить объем вычислений. Приведен пример вычисления второго вириального коэффициента для молекулярной системы твердых сфер. Такой подход позволяет учесть в ДФР особенности межмолекулярного взаимодействия в плотных молекулярных системах и аморфных пленках.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержки в рамках госзадания РФ № 3.1941.2017/ПЧ.

Список литературы

- [1] Саркисов Г.Н., Молекулярные функции распределения стабильных, метастабильных и аморфных классических моделей. // УФН. 2002. Т. 172. № 6. С. 647-669.
- [2] Baranau V., Tallarek U., How to predict the ideal glass transition density in polydisperse hard-sphere packings. // The Journal of chemical physics. 2015. Vol. 143. № 4. P. 044501.
- [3] Ignatieva L.N. and others, The study of short- and medium-range order in oxyfluoroniobate glasses. // Journal of Non-Crystalline Solids. 2014. Vol. 401. PP. 197-201.
- [4] Bomont J. M., Hansen J.P., Pastore G., An investigation of the liquid to glass transition using integral equations for the pair structure of coupled replicaes. // The Journal of chemical physics. 2014. Vol. 141. № 17. P. 174505.
- [5] Seoane B., Liquid-glass transition in equilibrium. // Physical Review E. 2014. Vol. 89. № 2. P. 022309.
- [6] Liasneuski H. and others, Impact of microstructure on the effective diffusivity in random packings of hard spheres // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116. № 3. P. 034904.
- [7] Agrafov Yu., Petrushin I.S., Close order in the molecular system near hard surface. // Physics Procedia. 2015. Vol. 71. P. 364.

Л.Е. АГУРЕЕВ¹, С.В. САВУШКИНА^{1,2}, А.А. АШМАРИН¹,
К.А. АНИКИН²

¹ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТА Al-Zr С КЕРАМИКОПОДОБНЫМ ПОКРЫТИЕМ, ПОЛУЧЕННЫМ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Порошковые алюминиевые композиты без добавок и легированные 0,2, 0,5 и 1% Zr были получены методом холодного прессования и спекания в форвакууме. На поверхностях образцов алюминиевых композитов формировали керамикоподобные оксидные покрытия методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) толщиной до 50 мкм. Критическая нагрузка разрушения ПЭО-покрытия толщиной 50 мкм составляет ~70 Н.

L.E. AGUREEV¹, S.V. SAVUSHKINA^{1,2}, A.A. ASHMARIN¹,
K.A. ANIKIN²

¹Keldysh Research Center, Moscow, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University)

STUDY OF Al-Zr COMPOSITE WITH CERAMIC-LIKE COATING OBTAINED BY PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION

Powder aluminum composites without additives and doped with 0.2, 0.5, and 1 % Zr were obtained using the cold pressing and sintering in vacuum. On the surfaces of aluminum composites samples oxide coatings with a thickness up to 50 μm were formed by plasma electrolytic oxidation (PEO). The addition of 1 % Zr to the aluminum composite more than doubles decrease the incorporation of silicon from the electrolyte into the near-surface layer of the PEO coating. The destruction critical load of PEO coating with a thickness of 50 μm is about 70 N.

Порошковые алюминиевые композиты являются перспективным конструкционным материалом с точки зрения их малого веса, низких капитальных затрат на производство и высокой удельной прочности [1]. Однако для эффективного использования таких материалов требуется повышение их рабочей температуры, износостойкости, коррозионной стойкости.

Добавка Zr способствует сопротивляемости высокотемпературной ползучести алюминия. Одним из методов решения проблемы повышения износостойкости и коррозионной стойкости алюминиевых композиционных материалов является формирование на их поверхности защитных керамикоподобных покрытий методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) [2-3].

Образцы алюминиевых композитов без добавок и легированных цирконием (Al + 1%Zr) получали методом классической порошковой металлургии (холодное прессование и спекание в форвакууме). В качестве матрицы использовали порошок алюминия со средним размером частиц 4 мкм (АСД-4, ТУ 48-5-226-87). Порошки смешивали в шаровой мельнице. Спекание проводили в форвакууме в печи при температуре 650°C в течение 180 мин. ПЭО-покрытия получали в электролите, содержащем 2 г/л гидроксида калия и 9 г/л жидкого стекла натриевого в анодно-катодном режиме. Суммарная плотность тока составляла 12,5 А/дм² при равенстве анодного и катодного токов, продолжительность процесса ПЭО – 60 мин и 90 мин.

Средний размер зерен композитов составляет около 5 мкм. Исследование легированного цирконием алюминиевого композита без ПЭО-покрытий с помощью синхронного термического анализа в режиме нагрев-охлаждение-нагрев показало, что с увеличением содержания Zr температура плавления алюминиевых композитов немного возрастала.

Поверхность ПЭО-покрытий характеризуется кратерообразными областями оксида алюминия и участками глобулярной структуры. Покрытия состоят из 3-х основных слоев: тонкого (барьерного) слоя на границе с подложкой толщиной около 0,5 мкм, основного (срединного) слоя и наружного слоя. Толщины ПЭО-покрытий для алюминиевого композита без добавок составили 35 и 50 мкм при продолжительности ПЭО 60 и 90 мин; для композитов (Al + 1% Cu) и (Al + 1% Zr) ~ 40 и 25 мкм при продолжительности ПЭО 60 мин.

Испытания методом скретч тестирования алмазным индентором при линейно возрастающей нагрузке от 1 до 120 Н при скорости нагружения 50 Н/мин показали, что нагрузка разрушения покрытия составляет ~ 70 Н.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-33-00841).

Список литературы

- [1] Костиков В.И. и др. // Перспективные материалы. 2014. № 7. С. 13-20.
- [2] Agureev L., Savushkina S., Ashmarin A. et al. // Metals. 2018. Vol. 8. P. 459.
- [3] Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A., Savushkina S.V. // J. Frict. Wear. 2016. Vol. 37, PP. 268–273.

И.В. АНИЩЕНКО, Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ,
С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТ

В работе приводятся результаты численного моделирования нескольких возможных конфигураций упорного магнитного подшипника на основе ВТСП. Показаны преимущества и недостатки для различных типов магнитной сборки.

I.V. ANISCHENKO, D.A. ABIN, M.A. OSIPOV,
S.V. POKROVSKII, I.A. RUDNEV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

MODELING OF MAGNETIC BEARINGS BASED ON COMPOSITE HTSC TAPES

This paper presents the results of numerical simulation of several possible configurations of a thrust magnetic bearing based on HTSC. The advantages and disadvantages for various types of magnetic clamping are shown.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и внедрению ВТСП магнитных подшипников в различные технические и электромеханические изделия, такие как газотурбинные установки, электродвигатели, скоростные роторные системы, турбодетандеры. В таких системах магнитных подшипник является одним из основных узлов, которые определяют их технико-экономические характеристики, долговечность и увеличивают время безотказной работы. Сложность проектирования и изготовления магнитных систем подобного типа заключается в необходимости учета влияния свойств сверхпроводящих материалов при работе в магнитных полях в сверхпроводящем состоянии и дальнейшего их взаимодействия с магнитной системой. В связи с этим необходимо использовать специальное программное обеспечение, учитывающее особенности трехмерной конструкции магнитной системы и резко нелинейные гистерезисные свойства материалов. В данной работе приводятся результаты комплексного моделирования методом конечных элементов в Н-формализме упорного типа магнитного ВТСП подшипника, представляющего собой ВТСП статор и блоки постоянных магнитов (ПМ) ротора,

вращающихся вокруг ВТСП элементов. В виду сложности производства кольцевых ПМ с радиальной намагниченностью требуемого размера, были предложены и обоснованы варианты замены кольцевых ПМ, намагниченных радиально, на секторальные ПМ, намагниченные радиально, а также кубические ПМ. Установлено, что сборка из 16 кубических ПМ уступает аналогичной сборке из секторальных ПМ по показателям однородности магнитного поля, однако ввиду легкости реализации сборки любых размеров, использование кубических ПМ является оптимальным для использования в магнитном подшипнике. Проведен расчет поля и токов в системе, расчет потерь для различных конфигураций системы, проведен анализ влияния однородности магнитного поля ротора на показатели подшипника, а также выполнены расчеты для различных вариантов сборки блока ПМ.

Работа выполнена при поддержке Российским Научным Фондом (проект № 17-19-01527).

П.И. БЕЗОТОСНЫЙ, К.А. ДМИТРИЕВА, С.Ю. ГАВРИЛКИН,
А.Н. ЛЫКОВ, А.Ю. ЦВЕТКОВ
ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК ТОЛЩИНОЙ ПОРЯДКА ДЛИНЫ КОГЕРЕНТНОСТИ

В работе предложен подход к расчету критических параметров неоднородной сверхпроводящей пленки. Изменение сверхпроводящих свойств задается путем варьирования значений длины когерентности и лондоновской глубины проникновения по толщине. В рамках предложенного подхода проведены расчеты и сравнение зависимостей критического тока от внешнего магнитного поля для двух случаев: неоднородного и однородного распределений сверхпроводящих свойств по толщине пленки. Дополнительно проанализированы температурные зависимости критического тока и критического магнитного поля для неоднородной сверхпроводящей пленки.

P.I. BEZOTOSNYI, K.A. DMITRIEVA, S.YU. GAVRILKIN,
A.N. LYKOV, A.YU. TSVETKOV
Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

THE CRITICAL STATE INVESTIGATION OF INHOMOGENEOUS SUPERCONDUCTING FILMS WITH A COHERENCE LENGTH THICKNESS ORDER

An approach to calculation of the critical parameters of an inhomogeneous superconducting film is proposed. Change in superconducting properties is set by varying values of the coherence length and the London penetration depth in thickness. In the framework of the proposed approach, calculations and comparison of the critical current on the external magnetic field dependences are carried out for two cases: inhomogeneous and homogeneous distributions of the superconducting properties over the film thickness. Additionally, the temperature dependences of critical current and the critical magnetic field for an inhomogeneous superconducting film were analyzed.

Тонкие пленки характеризуются неоднородностью их свойств, в том числе сверхпроводящих, по толщине. В частности, на границе подложки и самой пленки образуется переходный слой, что связано с отличием периода решетки материала подложки и материала, из которого напылена сама пленка. Для достаточно тонкой пленки параметры ее решетки, а так-

же другие свойства могут ощутимо отличаться от свойств материала, из которого сделана пленка. Исходя из этого модели, описывающие реальные сверхпроводящие пленки, должны учитывать неоднородность свойств по ее толщине.

В работе предложен подход к расчету критических параметров неоднородной сверхпроводящей пленки в рамках теории Гинзбурга-Ландау. Модельные распределения значений длины когерентности и лондоновской глубины проникновения по толщине, для которых проводился расчет, представлены на рис. 1. Были проведены расчеты зависимостей критического тока от внешнего магнитного поля для двух случаев: неоднородного и однородного распределений сверхпроводящих свойств по толщине пленки. Дополнительно проанализированы температурные зависимости критического тока и критического магнитного поля для неоднородной сверхпроводящей пленки. Более подробно см. [1].

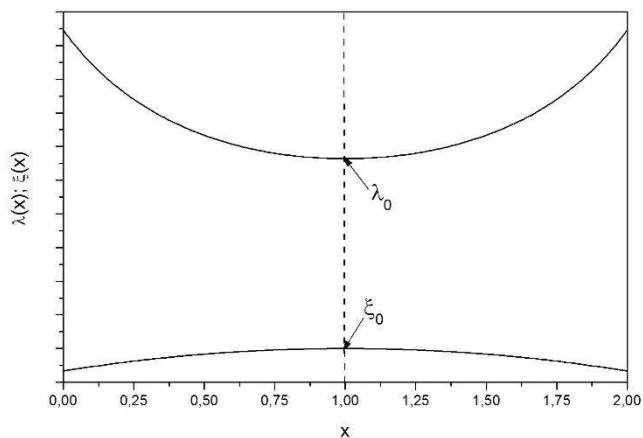


Рис.1. Модельные распределения длины когерентности $\xi(x)$ и лондоновской глубины проникновения магнитного поля $\lambda(x)$ по толщине сверхпроводящей пластины на примере пленки толщиной $d = 2\xi_0$.

Список литературы

- [1] Безотосный П.И., Гаврилкин С.Ю., Дмитриева К.А., Лыков А.Н., Цветков А.Ю. // ФТТ. 2019. Т. 61. № 2. С. 234–238.

А.А. ВАСИН, П.С. ВЕРВИКИШКО, Т.М. ФАЛЯХОВ,
М.А. ШЕЙНДЛИН

Объединенный Институт Высоких температур РАН, Россия, Москва

ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИЙ ПИРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

В работе представлен разработанный быстродействующий полихроматический пирометр и приведены соответствующие результаты экспериментов по определению излучательной способности вольфрама.

A.A. VASIN, P.S. VERVIKISHKO, T.M. FALIAKHOV,
M.A. SHEINDLIN

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

POLYCHROMATIC PYROMETER FOR TEMPERATURE MEASUREMENTS DURING LASER HEATING

The paper presents the developed high-speed polychromatic pyrometer and the corresponding experimental results on the spectral emissivity of tungsten.

Определение температуры объектов нагреваемых мощным лазерным излучением связано с решением ряда принципиальных проблем. Здесь, как правило, необходима высокая пространственная избирательность (малое пятно визирования), высокая скорость измерений и охват широкого температурного диапазона. Кроме того, в ходе лазерного нагрева происходят, как правило, различные физико-химические процессы на поверхности, приводящие к значительному изменению излучательной способности. Такие изменения сопровождают плавление (кристаллизацию), окисление поверхности, а также испарение, часто приводящее к селективному поглощению в паре и др. Понятно, что использование литературных данных по спектральной излучательной способности в этих условиях приводит к трудно оцениваемой ошибке в определении истинной температуры.

Пожалуй единственным возможным методом определения истинной температуры и излучательной способности в таких условиях является применение полихроматической пирометрии, основанной на анализе спектров теплового излучения. Такой полихроматический пирометр, разработанный для проведения экспериментов с лазерным нагревом туго-

плавких керамик, создан на основе быстродействующего коммерческого 256-ти канального спектрометра (диапазон длин волн 450-950 нм и скорость регистрации до 1000 спектр/с). А соответствующая оптическая система позволяет измерять температуру в пятне около 250 мкм. Привязка к шкале абсолютных интенсивностей излучения осуществлялась с помощью высокотемпературной модели черного тела.

Истинная температура определялась с помощью многопараметрической нелинейной подгонки измеренной спектральной интенсивности $I(\lambda, T)$, равной произведению функции Планка - $P(\lambda, T)$ и излучательной способности. Излучательная способность для каждого измеренного спектра при температуре T описывалась, при этом, в виде двухпараметрической функции длины волны:

$$I = \varepsilon(T, \lambda) \cdot P(T, \lambda) = \varepsilon(\lambda(a, b)) \cdot \frac{C_1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}) - 1}$$

Где C_1 и C_2 – пирометрические константы.

Таким образом, в ходе нелинейной подгонки измеренного спектра определялись три параметра: T , a и b , то есть значения истинной температуры и функции излучательной способности в выбранном приближении.

На Рис.1 представлены результаты измерений температуры и излучательной способности вольфрамовой ленточной температурной лампы с использованием различных функций для излучательной способности: линейной, экспоненциальной и квадратичной. Видно, что разброс значений истинной температуры находится в пределах 1% при использовании различных функций. Также, отмечено хорошее совпадение полученной излучательной способности вольфрама с литературными данными [1].

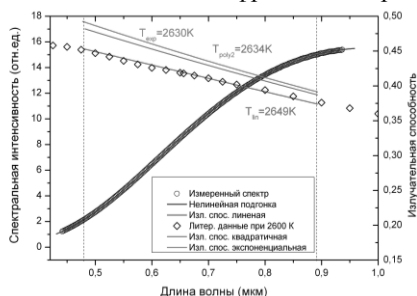


Рис.1 Результаты измерения температуры вольфрама

Список литературы

- [1] Латыев Л.Н., Петров В.А., Чеховской В.Я., Шестаков Е.И., Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А.Е. Шейншлина. М.: Энергия, 1974.

Д.Е. ВЕРВИКИШКО, С.А. КОЧАНОВА, И.А. ЛИПАТОВА,
Е.И. ШКОЛЬНИКОВ

Объединенный Институт Высоких температур РАН, Россия, Москва

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ И АЛЮМИНИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Предложены перспективные материалы – активированные угли, полученные термохимическим синтезом лиственной древесины, в качестве электродов двойно-нослойных суперконденсаторов с водным и органическим электролитом, а также алюминий-ионных аккумуляторов. Достигнутые на сегодняшний день результаты соответствуют мировому уровню.

D.E. VERVIKISHKO, S.A. KOCHANOVA, I.A. LIPATOVA,
E.I. SHKOLNIKOV

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

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CARBON FUNCTIONAL MATERIALS FOR SUPERCAPACITORS AND ALYUMINIUM-ION BATTERIES

Perspective materials – the activated carbons received by thermochemical synthesis of wood are offered as electrodes for double layer supercapacitors with aqua and organic electrolyte and also aluminum - ion batteries accumulators. The results achieved today correspond to the world level.

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому поиску путей повышения эффективности накопления энергии в перспективных электрохимических системах: двойнонослойных суперконденсаторах и в алюминий-ионных аккумуляторах, за счет воздействия на механизм процессов в электродах путем использования специально синтезированных и/или модифицированных углеродных материалов.

Актуальность алюминий-ионных аккумуляторов определяется наименьшей стоимостью в сочетании с потенциально наилучшими показателями удельной объемной емкости алюминиевого электрода по сравнению с другими щелочными металлами, высокими показателями мощности прототипов, превышающими альтернативные металл-ионные системы, а

также большей пожаро- и взрывобезопасностью аккумуляторов подобного типа. Новизна работы заключается в разработке новых катодных материалов с улучшенной энергоемкостью, достигаемой не только за счет интеркаляции алюминий содержащих соединений в графеноподобные структуры, но и за счет формирования двойного электрического слоя на поверхности нанопор активированных углей. Предложенные в работе методы синтеза и модификации позволяют варьировать вклады от обоих механизмов аккумулирования энергии путем прецизионного изменения в широком диапазоне параметров углеродных материалов на основе графитов и активированных углей. Среди них медиальные (до единиц нм) и латеральные размеры частиц графита с возможностью получения нанодисперсного графита и малослойного графена, толщина стенок нанопор активированных углей (от 2 до десятков графеновых слоев), латеральные размеры частиц угля (от ~100 нм до единиц микрон), характерный размер пор (от 0,8 до 5 нм) и удельная площадь поверхности (от 300 до 2000 м²/г). Впервые систематически изучается корреляция между структурой и характеристиками (энергоемкостью, мощностью, долговечностью) данного типа аккумуляторов.

В части, посвященной суперконденсаторам, на основе достигнутых ранее результатов для других электролитов ставится задача по созданию оптимальных по структуре углеродных материалов и электродов для устройств на основе водных растворов щелочи с увеличенной мощностью. Разработка мощных суперконденсаторов актуальна в ряде областей, связанных с созданием мощной импульсной техники. Достоинствами выбранного электролита являются высокая ионная проводимость, возможность применения при низких температурах, нетоксичность, низкая цена. Важнейшим и, по существу, единственным условием для выполнения этой задачи является создание конкурентоспособного по удельным характеристикам и экономическим показателям активированного угля.

Работа охватывает вопросы, начиная от синтеза углеродных наноструктурированных материалов, их диспергирования, измерения физико-химических свойств и заканчивая отработкой технологии сборки электрохимических накопителей энергии и их электрохимическими испытаниями.

П.С. ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН
Объединенный Институт Высоких температур РАН, Россия, Москва

ИЗУЧЕНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 1-2000 БАР

Представлены результаты изучения плавления карбида кремния методом лазерного нагрева в атмосфере инертного газа при давлениях до 2000 бар. Приведены экспериментально определенные температуры инконгруэнтного плавления в зависимости от давления. Проведен элементный анализ поверхности переплавленной зоны методом растровой электронной микроскопии и анализ шлифов через зону расплава. Полученные данные свидетельствуют о существенном изменении состава образца при нагреве до температуры выше 3170K.

P.S. VERVIKISHKO, M.A. SHEINDLIN
*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia.*

MELTING OF SILICON CARBIDE AT PRESSURES UP TO 2000 BAR

The results of a study of silicon carbide melting by laser heating in an inert gas at pressures up to 2000 bar are presented. Temperatures of the incongruent melting at different pressures are experimentally determined. Elemental analysis of the surface and sections through the melt zone are performed using scanning electron microscopy. A significant change in the composition of the sample when heated to a temperature above 3170 K is revealed.

Плавлению SiC посвящено относительно небольшое число исследований [1-4], при этом измерения [1,2] выполнены в диапазоне давлений инертного газа 1-120 бар, а [3,4] выполнены с использованием техники сверхвысоких давлений от 20 до 100 кбар. Эксперименты, выполненные при относительно умеренных давлениях показали, что при температуре около 3100K отчетливо наблюдался фазовый переход. Однако. Оказалось, что при этой температуре твердый карбид кремния распадается на углерод и кремний. Считая, это отмеченное явление является следствием испарения углерода авторы [1,2] провели эксперименты при давлении до 120 бар пытаясь уменьшить этот эффект. Однако. Как оказалось, это не привело к изменению соответствующей температуры. При существенном повышении давления среды до 100 кбар в работе [3] была достигнута

практически нулевая степень разложения, однако из-за отсутствия возможности температурных измерений в работе [3] представлена лишь оценочная фазовая диаграмма.

Мотивацией данной работы была возможность проведения точных измерений температуры при давлениях до 2000 бар.

В докладе представлены результаты экспериментов по плавлению SiC при давлениях среды до 2 кбар с использованием лазерного нагрева в газовой среде и метода полихроматической пирометрии для измерения температуры. Температура фазового перехода была получена: 3170 ± 50 K, разложение карбида кремния на углерод и кремний было зафиксировано во всем диапазоне давлений. На рисунке 1 представлена термограмма плавления карбида кремния при давлении гелия 1600 бар.

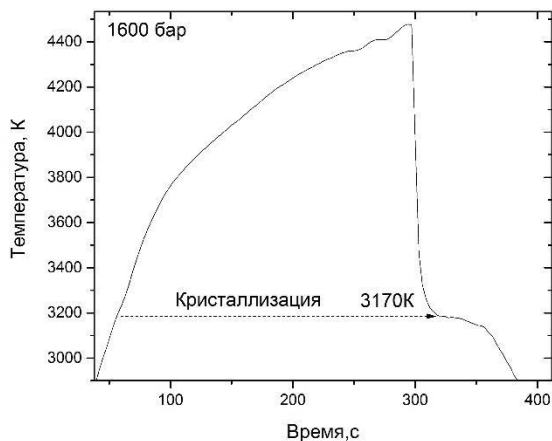


Рис.1 Термограмма плавления SiC

Список литературы

- [1] Scace R.I., Slack G.A. // J. Chem. Phys. 1959. Vol. 30. PP.1551–1555.
- [2] Sadler L.Y., Shamsuzzoha M., Response of silicon carbide to high-intensity laser irradiation in a high-pressure inert gas atmosphere // J. Mater. Res. 1997. Vol. 12. № 1.
- [3] Motohiro Togaya, Shin Sugiyama, Melting Behavior of b-SiC at High Pressure // Rev. High Pressure Sci. Technol. 1998. Vol. 7. PP. 1037-1039.
- [4] Sokolov P.S., Mukhanov V.A., Chauveau T., Solozhenko V.L., On Melting of Silicon Carbide under Pressure // Journal of Superhard Materials. 2012. Vol. 34. № 5. PP. 339–341.

П.С. ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН

Объединенный Институт Высоких температур РАН, Россия, Москва

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И КОНДЕНСАЦИИ УГЛЕРОДА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ СВЫШЕ 200 БАР

В докладе представлены результаты серии экспериментов по плавлению углерода с использованием лазерного нагрева в инертной атмосфере при давлениях 200-6000 бар. Проведены оценки плотности жидкого углерода в зависимости от давления буферного газа. Изучена морфология кристаллических образований, проведены измерения размеров частиц, конденсированных из жидкости.

P.S. VERVIKISHKO, M.A. SHEINDLIN

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

INVESTIGATION OF CRYSTALLIZATION AND CONDENSATION OF CARBON AT PRESSURES OVER 200 BAR

The results of a series of experiments on the melting of carbon using laser heating in an inert atmosphere at pressures of 200-6000 bar are presented. The variation of density of liquid carbon with the buffer gas pressure is estimated. The morphology of the both frozen structure of carbon melts and carbon particles formed in the condensed vapor studied using SEM microscopy are presented.

Свойства жидкого углерода, такие как плотность и электропроводность и др., в окрестности тройной точки углерода практически неизвестны. В значительной степени это определяется тем, что по имеющимся малочисленным данным [1] жидкий углерод не электропроводен вплоть до давлений в несколько килобар. А именно нагрев прямым пропусканием тока при высоком статическом давлении является практически единственным возможным для получения достоверной информации о плотности жидкого углерода. Таким образом, применение лазерного нагрева графита в камере с высоким давлением буферного газа [2] является здесь единственной альтернативой, несмотря на понятные ограничения, свойственные поверхностному нагреву. Возможность получение сведений о плотности жидкого углерода определяется высокой скоростью охлаждения расплава при отключения лазерного нагрева вследствие теплового излучения при

температуре около 5000 К с плотностью около 3.5 кВт/см², при которой происходит «закалка» жидкости при кристаллизации. Таким образом, определяя относительный объем полостей, образовавшихся в застывшей капле жидкого углерода вследствие разности плотностей жидкости, удастся сделать оценку снизу для его плотности. Анализируемые шлифы через зону расплава изготавливались как методом, применяемым в классической металлографии так и с помощью ионной резки. Анализ шлифа переплавленной зоны проводился методом растровой электронной микроскопии. На основе данного анализа были получены данные о плотности жидкого углерода в широком диапазоне давлений. Кривая зависимости расширения углерода при плавлении от давления представлена на рисунке 1.

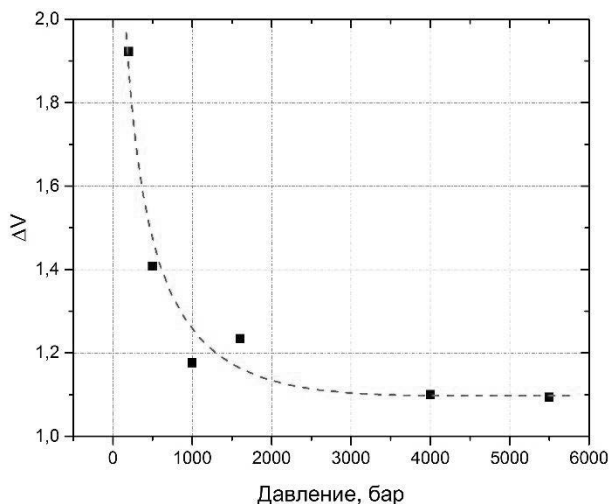


Рис.1 Зависимость расширения углерода при плавлении от давления среды.

Список литературы

- [1] Bundy F.P., Melting of Graphite at Very High Pressure // The Journal of Chemical Physics. 1963. Vol. 38. P. 618.
- [2] Musella M., Ronchi C., Brykin M., Sheindlin M., The molten state of graphite: An experimental study. // J. of Applied Physics. 1998. Vol. 84. № 5. PP. 2530-2537.

П.С. ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН
Объединенный Институт Высоких температур РАН, Россия, Москва

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ИЗУЧЕНИИ ПЛАВЛЕНИЯ ГРАФИТА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

Изучены процессы плавления и кристаллизации углерода при лазерном нагреве в условиях статического давления газа до 6 кбар. Получены данные по наклону кривой плавления в диапазоне от тройной точки до 6 кбар. Приведены микрофотографии поверхности переплавленной зоны, сделаны оценки влияния давления буферного газа на процесс кристаллизации жидкого углерода.

P.S. VERVIKISHKO, M.A. SHEINDLIN
*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia.*

RECENT ADVANCES IN LASER-PULSE MELTING OF GRAPHITE

The processes of melting and crystallization of carbon during laser-pulse heating was studied under conditions of static gas pressure up to 6 kbar. The slope of the melting line in the range from the triple point to 6 kbar has been obtained. Some SEM-images of the frozen carbon melt are presented. The gas pressure influence on the peculiarities of crystallization of liquid carbon has been studied.

Положение тройной точки углерода и особенности плавления графита остаются предметом постоянных дискуссий в литературе на протяжении многих десятилетий. Основной причиной этой несогласованности является сочетание чрезвычайно высокой температуры плавления графита, значительно превышающей 4000 К, и высокой скорости испарения при температуре плавления. Результаты, представленные в настоящей работе, получены с помощью техники лазерного нагрева при высоком давлении [1], при этом особое внимание было уделено визуализации процесса нагрева и достоверности измерений истинной температуры. Первая задача решалась с помощью применения высокоскоростной видеорегистрации процессов на поверхности, с применением мощного диодного лазера в качестве источника подсветки для проведения контрастной съемки. Для определения истинной температуры был разработан высокоскоростной спектропирометр с частотой регистрации спектров до 5 кГц охватывающий диапазон 460-900 нм. Для получения надежных данных по кривой

плавления графита измерения выполнены при давлениях гелия до 6 кбар. Соответствующая схема установки представлена на рисунке 1.

В работе подробно изучен аномальный рост скорости нагрева в точке плавления графита, впервые отмеченный в [1] и связанный с уменьшением теплопроводности жидкого углерода по сравнению с исходным графитом. Эта особенность была изучена на термограммах, полученных при нагреве как изотропного мелкокристаллического графита, так и пирографита в диапазоне давлений 0,5-6 кбар. Анализ поверхности и шлифов, через переплавленную зону, был выполнен с помощью растровой электронной микроскопии, что позволило построить зависимость расширения углерода при плавлении от давления среды.

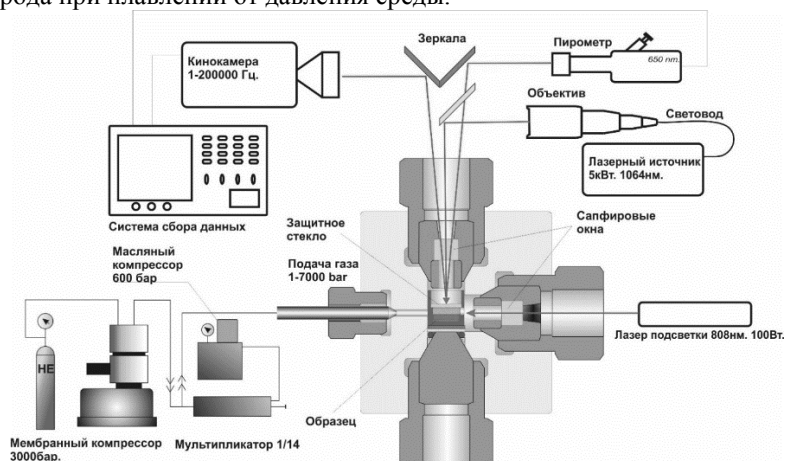


Рис.1 Схема установки

С помощью визуализации процесса плавления удалось впервые подтвердить, что появление блестящей зоны расплава на поверхности происходит синхронно с изменением скорости нагрева. Таким образом, подтверждено соответствие температуры в точке излома на термограмме температуре плавления. Обнаружено, что в диапазоне давлений 0.5-2 кбар происходит аномальное изменение наклона кривой плавления графита.

Список литературы

- [1] Musella M., Ronchi C., Brykin M., Sheindlin M., The molten state of graphite: An experimental study. // J. of Applied Physics. 1998. Vol. 84. № 5. PP. 2530-2537.

П.С.ВЕРВИКИШКО, М.А. ШЕЙНДЛИН, Д.Е. ВЕРВИКИШКО,
Е.И. ШКОЛЬНИКОВ

Объединенный Институт Высоких температур РАН, Россия, Москва.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ИСПАРЕНИЯ ГРАФИТА

Исследованы процессы испарения графита методом лазерного нагрева с последующей конденсацией, описана конструкция экспериментальной установки, режимов синтеза и результаты пилотных пусков. Изучена пористая структура полученных материалов методом Лимитированного Испарения.

P.S.VERVIKISHKO, M.A. SHEINDLIN, D.E. VVERVIKISHKO,
E.I. SHKOLNIKOV

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

RESEARCH OF NANODISPERSE POWDERS RECEIVED BY METHOD OF LASER EVAPORATION OF GRAPHITE

Graphite evaporation processes during laser-pulse heating with the subsequent condensation are investigated. The design of the experimental setup, the modes of synthesis and results of pilot start-up are described. The pore structure of the received materials is studied by the Limited Evaporation technique.

Углеродные сажи применяются в различных областях науки и техники. Данная работа посвящена новому способу получения углеродных нанодисперсных порошков – углеродных саж, обладающих заранее заданными свойствами, для применения в электрохимических устройствах: пористых электродах суперконденсаторов, топливных элементов и др.

Углеродный наноструктурированный порошок широко используются при создании инновационных источников тока в силу своей развитой поверхности, химической устойчивости, высокой электропроводности. Увеличение эффективности таких устройств во многом связано со свойствами использованных материалов. В литий-ионных аккумуляторах и двойно-слойных суперконденсаторах в качестве основного материала электрода широко используются углеродные материалы с развитой поверхностью (для увеличения площади формирования двойного электрического слоя или интеркаляции ионов лития). Добавки углеродного графитизированно-

го технического углерода служат для промотирования электронного транспорта в электроде [1].

Несколько иные требования предъявляются к техническому углероду со стороны разработчиков низкотемпературных топливных элементов. Здесь технический углерод выступает в качестве носителя катализатора в топливных элементах с щелочным или твердым полимерным электролитом или в качестве основной составляющей газодиффузионного слоя (ГДС) катодов металл-воздушных топливных элементов. Так как катализаторы топливных элементов чувствительны к примесям, то важным моментом является отсутствие в составе технического углерода следов металлов, серы, хлор – содержащих соединениях [2]. Для технического углерода, используемого в ГДС, необходимо обеспечить высокую гидрофобность, поскольку в противном случае ГДС не сможет выполнять функции гидрозапорного слоя для предотвращения вытекания электролита. Наконец, важным параметром является коррозионная стойкость технического углерода в диапазоне потенциалов от 0,2 до 1,4 В (относительно обратимого водородного электрода), характерных для работы топливного элемента. При недостаточной коррозионной устойчивости будет происходить эрозия поверхности технического углерода, сопровождающаяся агломерацией частиц катализатора и потерей его активности за счет снижения удельной поверхности.

Из рассмотренного выше видно, что комплекс требований к техническому углероду для электрохимических применений достаточно обширен и существенно зависит от конкретных электрохимических устройств, в которых ее планируется использовать. Таким образом, успех применения технического углерода в электрохимических устройствах во многом зависит от возможности управлять его физико-химическими свойствами в процессе синтеза.

В данной работе описан разработанный способ получения дисперсных углеродных материалов методом лазерного нагрева графитовых образцов, а также представлены результаты исследования их физико-химических свойств. Основное отличие предлагаемого метода от традиционных заключается в использовании в качестве сырья графита, а не углеводородов. Сажа, полученная таким образом, отличается высоким содержанием углерода (более 99%) и имеет высокую площадь удельной поверхности.

Список литературы

- [1] J. Leis et al. / Carbon 44 (2006) 2122–2129
- [2] Тарасевич М.Р. Электрохимия углеродных материалов. М.: Наука, 1984

Б.Р. ГАЙНАНОВ¹, В.В. ПОПОВ¹, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹,
А.А. ИВАНОВ¹, А.В. КУЗНЕЦОВ¹, А.А. ЯРОСЛАВЦЕВ^{1,2},
Ф. Д'АКАПИТО³, А. ПУРИ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²European XFEL GmbH, Шенефельд, Германия

³Европейский центр синхротронного излучения, Гренобль, Франция

ЛОКАЛЬНЫЙ БЕСПОРЯДОК В ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ФРУСТРИРОВАННЫХ ПИРОХЛОРАХ $Ln_2M_2O_7$ ($Ln = Gd, Tb, Dy, M=Zr, Ti$).

Представлены результаты исследования температурных зависимостей спектров рентгеновского поглощения (EXAFS и XANES) геометрически фрустрированных оксидов $Ln_2Ti_2O_7$ ($Ln = Gd, Tb, Dy$) с пирохлорной структурой в диапазоне 10-300 К. Получены температурные зависимости длин межатомных связей $Ln-O$, $Ti-O$ и их коэффициентов Дебая-Валлера от температуры. Определены температуры Эйнштейна, характеризующие жесткости связей и их локальное статическое и динамическое разупорядочение. Проведено сравнение полученных характеристик локального беспорядка в $Dy_2Ti_2O_7$ со структурой пирохлора $Dy_2Zr_2O_7$, имеющего неупорядоченную структуру дефектного флюорита.

B.R. GAYNANOV¹, V.V. POPOV¹, A.P. MENUSHENKOV¹,
A.A. IVANOV¹, A.V. KUZNETSOV¹, A.A. YAROSLAVTSEV^{1,2},
F. D'ACAPITO³, A. PURI³

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

²European XFEL GmbH, Schenefeld, Germany

³European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

THE LOCAL DISORDERED IN GEOMETRIC FRUSTRATION PYROCHLORES $Ln_2M_2O_7$ ($Ln=Gd, Tb, Dy; M=Zr, Ti$)

The results study of the temperature dependences of the X-ray absorption spectra (EXAFS and XANES) of geometrically frustrated oxides $Ln_2Ti_2O_7$ ($Ln = Gd, Tb, Dy$) with a pyrochlore structure in the temperature range of 10-300 K are presented. The temperature dependences of $Ln-O$, and $Ti-O$ interatomic bond lengths of their local disordering (Debye-Waller factors) on the temperature have been obtained. Einstein temperatures characterizing the stiffness of each bond and their local static and dynamic disordering have been determined. The characteristics of local disorder in pyrochlores

$\text{Dy}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ similar with $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ and having a disordered fluorite structure are compared.

Несмотря на существование строгого дальнего порядка, в пироклорах присутствует достаточно значительный ~ 0.01 нм [1] локальный беспорядок как статического, так и динамического характера, который в последнее время стали активно привлекать для объяснения особенностей основного состояния геометрически фрустрированных магнетиков [1, 2]. Исследования локального беспорядка проводятся на источниках нейтронов и синхротронного излучения с использованием локально-чувствительных методов анализа парной функции распределения атомов (PDF) [1], магнитного нейтронного рассеяния [2] и рентгеновской спектроскопии поглощения (EXAFS и XANES) [3]. В связи с этим, целью настоящей работы являлось изучение влияния типа РЗЭ на локальный беспорядок с помощью исследования температурных зависимостей спектров рентгеновского поглощения (EXAFS и XANES) в интервале 10 – 300 К. Образцы $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ были синтезированы комбинацией золь-гель и методов соосаждения с последующим прокаливанием прекурсоров [4]. Для сравнения мы также провели исследование сложного оксида $\text{Dy}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, кристаллизующегося в структуру флюорита, не обладающую дальним порядком, в котором нет геометрической фрустрации.

Установлено, что наиболее вероятное влияние на геометрическую фрустрацию, оказывает локальное искажение наиболее жесткой $\text{Ln-O}(2)$ связи. При этом для $\text{Dy-O}(2)$, $\text{Tb-O}(2)$ связей искажение носит преимущественно статический, а для $\text{Gd-O}(2)$ - преимущественно динамический характер. Обнаружено, что в титанате диспрозия жесткости связей $\text{Dy-O}(1)$ и $\text{Ti-O}(1)$ значительно меньше жесткости Dy-O и Zr-O связей в оксиде $\text{Dy}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ со структурой флюорита. Причем для флюорита, в отличие от пироклора, статическое искажение кислородной сферы окружения РЗЭ выше, чем окружения M^{4+} . При этом статическое искажение связи Dy-O в цирконате на порядок превышает значение для $\text{Dy-O}(1)$ в титанате диспрозия, что говорит о высокой степени дефектности структуры флюорита.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-12-00133).

Список литературы

- [1] Trump B.A., Koohpayeh S.M., Livi K.J.T. et al. // Nat. Comm. 2018. Vol. 9. P. 2619.
- [2] Sibille R., Lhotel E., Hatnean M.C. et al. // Nat. Comm. 2017. Vol. 8. P. 898.
- [3] Blanchard P.E.R., Clements R., et al. // Inorg. Chem. 2012. Vol. 51. PP.13237–13244.
- [4] Popov V.V., Menushenkov A.P., Gaynanov B.R. et al. // J. Alloys Compd. 2018. Vol. 746. PP. 377-390.

А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ¹, Л.П. СУХАНОВ^{1,2}, Р.Г. ЧУМАКОВ¹,
В.Г. СТАНКЕВИЧ¹

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

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ ПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ C₆₀F₁₈ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Для адекватного описания адсорбции и самоорганизации полярных молекул C₆₀F₁₈ на поверхности Au(111) были проведены квантово-химические исследования электрических и электронных свойств отдельной молекулы. Проведены квантово-химические расчеты молекулы C₆₀F₁₈ на поверхности высокоориентированного пиролитического графита, использующие кластерную модель и различные методики.

A. V. GORYACHEVSKIY¹, L. P. SUKHANOV^{1,2},
R. G. CHUMAKOV¹, V. G. STANKEVICH¹

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

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

THEORETICAL STUDY OF PHYSICAL ADSORPTION OF THE C₆₀F₁₈ POLAR MOLECULES ON DIFFERENT SURFACES

For adequate description of the adsorption and self-assembly of C₆₀F₁₈ polar molecules on the Au(111) surface, quantum-chemical studies of the electronic and electrical properties of a single molecule are performed. Quantum-chemical calculations of C₆₀F₁₈ molecule on highly oriented pyrolytic graphite substrate are performed using cluster model and various methods.

Используя различные методы теории функционала плотности [1], были впервые посчитаны с контролируемой точностью такие свойства отдельной молекулы, как электрический дипольный момент, распределения электростатического потенциала, напряженности электрического поля и электронной плотности. Было получено уточненное значение электрического дипольного момента молекулы. Было показано, что известное приближение точечного диполя для напряженности электрического поля выполняется с точностью 30% даже на расстояниях вдвое больше размера молекулы. Структурные фрагменты рассчитанных низшей вакантной и

высшей занятой молекулярных орбиталей отнесены к их экспериментальным образам, ранее полученным при помощи сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии.

Проведены квантово-химические расчеты молекулы $C_{60}F_{18}$ на поверхности высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ), использующие кластерную модель и различные методики. Сканирование поверхности потенциальной энергии методом Меллера-Плессе 2-го порядка [2] показало, что имеет место физическая адсорбция молекул $C_{60}F_{18}$ на ВОПГ. Отсутствие химической адсорбции было также показано с помощью теории молекулярных орбиталей [3].

Информация об электронных и электрических свойствах отдельной молекулы открывает возможность лучше понять причины адсорбции молекулярных ансамблей на различных поверхностях.

Список литературы

- [1] Kohn W., Sham L.J., Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Phys. Rev. A. 1965. Vol. 140. № 4. PP. A1133-A1138.
- [2] Каплан И.Г., Межмолекулярные взаимодействия. Физическая интерпретация, компьютерные расчеты и модельные потенциалы. Пер. с англ., М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
- [3] Фудзинага С., Метод молекулярных орбиталей. Пер. с японск., М.: Мир, 1983.

П.Д. ГРИГОРЬЕВ

*Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

ПРИРОДА МАГНИТНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ YBCO

Фурье-образ наблюдаемых магнитных квантовых осцилляций (МКО) в высокотемпературных сверхпроводниках YBaCuO имеет резкий низкочастотный пик с двумя меньшими соседними пиками. Разделение и даже положение этих трех пиков практически не зависит от легирования. Этот набор частот был ранее объяснен довольно специфической перестройкой поверхности Ферми. Мы предполагаем, что эти МКО имеют другое происхождение, и их частоты связаны с перескоком электронов между слоями и между бислоями, а не непосредственно с площадью крошечных карманов поверхности Ферми.

P.D. GRIGORIEV^{1,2}

¹*L.D. Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia*

²*National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

ORIGIN OF MAGNETIC OSCILLATIONS IN HIGH- TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS YBCO

The Fourier transform of the observed magnetic quantum oscillations (MQO) in YBaCuO high-temperature superconductors has a prominent low-frequency peak with two smaller neighbouring peaks. The separation and even the position of these three peaks is almost independent of doping. This pattern has been explained previously by rather special, exquisitely detailed, Fermi-surface reconstruction. We propose that these MQO have a different origin, and their frequencies are related to the bilayer and inter-bilayer electron hopping rather than directly to the areas of tiny Fermi-surface pockets.

Наблюдаемые магнитные квантовые осцилляции (МКО) в высокотемпературных сверхпроводниках YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$) имеют довольно необычный состав гармоник: три близкие равноудаленные и достаточно малые частоты $\sim 530\text{Т}$ и $530 \pm 90\text{Т}$, что соответствует около 2% зоны Бриллюэна, причем центральная гармоника имеет амплитуду более чем в ~ 2 раза выше, чем с каждой из сторон [1,2]. Общепринятое объяснение таких квантовых осцилляций предполагает перестройку исходной большой поверхности Ферми из-за волны зарядовой плотности (ВЗП) [2]. Однако это объяснение имеет ряд существенных недостатков. Например,

оно предполагает также набор других близких частот МКО, которые не наблюдаются экспериментально. Кроме этого, в этой модели наблюдаемые частоты МКО должны сильно и по-другому зависеть от уровня легирования, что также не наблюдается в эксперименте. Мы предлагаем альтернативную интерпретацию наблюдаемых магнитных осцилляций в YBCO [3,4], которая довольно естественным образом объясняет наблюдаемую картину без дополнительных подгоночных параметров. Наша модель МКО учитывает двухслойную кристаллическую структуру YBCO и включает соответствующее расщепление электронного спектра и дисперсию электронов перпендикулярно проводящим слоям. При этом основная наблюдаемая частота $\sim 530\text{Т}$ соответствует величине бислойного расщепления площади кармана поверхности Ферми (ПФ), а не площади самого кармана. Такие "медленные" магнитные осцилляции появляются даже без перестройки ПФ и почти не зависят от уровня легирования. Они ранее наблюдались в органических металлах [5] и трителлуридах редкоземельных металлов [6]. В отличие от обычных МКО, эти медленные осцилляции намного слабее подавляются температурой и длинноволновой пространственной неоднородностью образца, типичной для ВТСП кристаллов и приводящей к размытию уровня Ферми вдоль образца. Поэтому они легче наблюдаются в эксперименте. Предложенная интерпретация позволяет разрешить «противоречие» данных ARPES и МКО, а также объясняет некоторые другие особенности наблюдаемых МКО в YBCO, которые довольно сложно объяснить сценарием перестройки ПФ вызванной ВЗП.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 19-02-01000 и 18-02-00280, и фондом развития теоретической физики и математики «Базис».

Список литературы

- [1] Sebastian S.E. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108. P. 196403.
- [2] Sebastian S.E., Proust C. // Annu. Rev. Cond. Matter Phys. 2015. Vol. 6. P. 411.
- [3] Grigoriev P.D., Ziman T. // JETP Lett. 2017. Vol. 106. P. 361.
- [4] Grigoriev P.D., Ziman T. // Phys. Rev. B. 2017. Vol. 96. P. 165110.
- [5] Kartsovnik M.V., Grigoriev P.D. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89. P. 126802.
- [6] Grigoriev P.D., Sinchenko A.A., Lejay P. et al. // Eur. Phys. J. B. 2016. Vol. 89. № 6. P. 151.

Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО¹, К.С. ГРИШАКОВ¹, Е.А. МАЗУР^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ФОНОННЫЕ СВОЙСТВА «ТРУБЧАТОГО» ГИДРИДА ЛАНТАНА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Теоретически предсказана новая структура гидрида лантана La_2H_{24} , динамически устойчивая вплоть до давлений порядка 150 ГПа. Данная структура является полуметаллом и обладает низкой симметрией кристаллической решетки P-1. Характерной особенностью такой структуры является присутствие цепочек квазимолекул водорода, что приводит к наличию в фононном спектре частот, порядка 420 мэВ, превышающих максимальную частоту колебаний решетки металлического водорода фазы FDDD ($\omega \sim 360$ мэВ).

N.N. DEGTYARENKO¹, K.S. GRISHAKOV¹, E.A. MAZUR^{1,2}

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

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

ELECTRONIC AND PHONON PROPERTIES OF “TUBULAR” LANTHANUS HYDRIDE UNDER PRESSURE

A new structure of lanthanum hydride La_2H_{24} , which is dynamically stable up to pressures of the order of 150 GPa, is theoretically predicted. This structure is a semimetal and has a low crystal symmetry P-1. A characteristic feature of this structure is the presence of chains of quasi-molecular hydrogen, which leads to the presence frequencies of the order of 420 meV in the phonon spectrum, exceeding the maximum oscillation frequency of the metallic hydrogen lattice of the FDDD phase ($\omega \sim 360$ meV).

В работе [1] экспериментально было показано, что гидриды серы, лантана и ряда других элементов демонстрируют высокую критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние, достигающую 203 К, 215 К, 260 К, при очень высоких давлениях порядка 190 ГПа.

Нами были отобраны несколько структур гидридов лантана с различной стехиометрией по содержанию водорода и разной симметрией (симметрия указана в скобках): LaH_{16} (P6MMM), La_2H_{32} (I4/mmm), LaH_{15} (C2/M), LaH_{12} (P6MMM), La_2H_{24} (P-1), La_2H_{22} (P-1), LaH_{10} (C2/M), LaH_{10} (FM-3M), LaH_{20} (P-1). Принцип отбора – примерное соответствие стехио-

метрии образцов в работе [1]. В рамках теории функционала плотности в базе плоских волн проведены оптимизация их геометрии, а также расчеты электронных и фононных характеристик. Все высоко симметричные структуры гидридов оказались динамически неустойчивы в интервале давлений $P=150\div 200$ ГПа, т.е. фононный спектр содержал мнимые частоты.

Динамически устойчивой оказалась структура, обладающая низкой симметрией P-1 с элементарной ячейкой La_2H_{24} , которая изображена на рис. 1а.

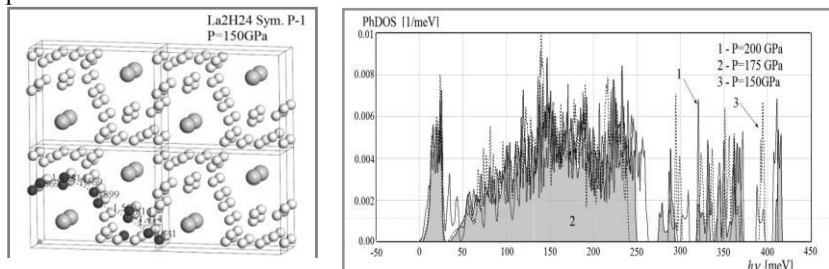


Рис. 1. а – структура La_2H_{24} с симметрией P-1 (выделена цепочка атомов), б – плотность числа фононных колебаний при давлении $P=200$ ГПа (1 – сплошная линия), 175 ГПа (2 – сплошная линия и затемнение) и 150 ГПа (3 – пунктирная линия)

Как видно из рис. 1б в фононном спектре гидрида лантана La_2H_{24} мнимых частот нет для указанных давлений 150-200 ГПа. Расчеты показали, что структура фазы гидрида лантана La_2H_{24} с симметрией P-1 является энергетически предпочтительной (обладает наименьшим значением энтальпии) в интервале давлений $150\div 200$ ГПа; данная структура является полуметаллом; атомы La допируют атомы водорода; структура La_2H_{24} содержит элементы, подобные трубкам, которые связаны между собой. Найденная нами структура является новой и открывает путь для исследования еще одного класса высокотемпературных соединений водорода, стабильных при существенно более низких давлениях, чем чистый металлический водород.

Список литературы

- [1] Somayazulu M., Ahart M., Mishra A., Geballe Z.M., Baldini M., Meng Y., Struzhkin V.V., Hemley R.J., Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures // arXiv:1808.07695).

А.Б. ДЮБУА, А.А.ИВАНОВА, А.Н. КОНЮХОВ,
Е.С. КУЛИКОВА, С.Н. МАШНИНА, А.С. САФОШКИН
Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛЯРИТОНА НА ГРАФЕНЕ

В работе рассмотрен процесс дифракции ТМ – поляризованной электромагнитной волны гауссова пучка на МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) структуре с учетом нелинейности диэлектрической проницаемости полупроводниковой пленки (графена). В рамках теории развит модовый метод расчета процесса взаимодействия излучения со структурой, позволяющий рассчитывать для фиксированного потока энергии возмущения потока энергий возникающих в процессах дифракции.

A.B. DUBOIS, A.A. IVANOVA, A.N. KONYUKHOV,
E.S. KULIKOVA, S.N. MASHNINA, A.S. SAFOSHKIN
Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, Russia

EXCITATION OF SURFACE POLARITON ON GRAPHENE

The paper considers the process of diffraction of a TM - polarized electromagnetic wave of a Gaussian beam on a MIS (metal - dielectric - semiconductor) structure taking into account the nonlinearity of the dielectric constant of the semiconductor layer (graphene). Within the framework of the theory, a mode method has been developed for calculating the process of interaction of radiation with a structure, which makes it possible to calculate perturbations of energy fluxes arising in diffraction processes for a fixed energy flux.

В работе произведен расчет процесса отражения гауссова пучка с возбуждением поверхностных и объемных электромагнитных полей в структуре, где уже при относительно небольших напряженностях электромагнитного поля нелинейность в диэлектрической проницаемости будет сказываться на процессе отражения от нелинейной структуры. Последняя представляет собой четыре области, характеризующиеся диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 - вакуум, $\epsilon_2(\omega)$ - металл, $\epsilon_3(\omega)$ - тонкая полупроводниковая нелинейная пленка (графен), ϵ_4 - диэлектрик (рис. 1).

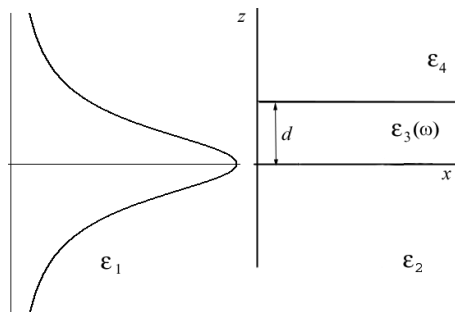


Рис. 1. Схема дифракции при нормальном падении ЭМ волны на диэлектрический барьер.

Уравнения Максвелла $i\omega \mathbf{H} = c \operatorname{rot} \mathbf{E}$ и $i\omega \varepsilon_i(\omega) \mathbf{E} = -c \operatorname{rot} \mathbf{H}$ в декартовой системе в совокупности с гармоническим характером распространения каждой моды вдоль оси X $\{\mathbf{H}(x, z), \mathbf{E}(x, z)\} = \{\mathbf{H}(z), \mathbf{E}(z)\} \exp(ik_x x)$ связывают компоненты мод ТМ — поляризованного излучения (E_x, E_z, H_y)

следующим образом: $\mathbf{E}_x(x, z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{\partial H_y}{\partial z}$; $\mathbf{E}_z(x, z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{\partial H_y}{\partial x}$;

$$E_x(z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{dH_y}{dz}; \quad E_z(z) = -\frac{c}{\omega \varepsilon_i} k_x H_y(z), \quad \text{что легко получить, учитывая}$$

планарность задачи [1]. Огибающие моды $H(z)$, а также волновое число k_x определяются из волнового уравнения и граничных условий. Волновое уравнение вытекает из уравнений Максвелла и дает зависимость поля

$$H_y(z) \text{ для каждого из квадрантов: } \frac{d^2 H_y}{dz^2} + \left[\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_i - k_x^2 \right] H_y = 0 \text{ с гранич-}$$

ными условиями $H_y(z = -0) = H_y(z = +0)$, $E_x(z = -0) = E_x(z = +0)$, которые полностью определяют структуру каждой моды при $x < 0$ и $x > 0$.

Список литературы

- [1] Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н., Кучерявый С.И., Машнина С.Н., Сафoshкин А.С., Особенности решения интегро-дифференциальных уравнений Максвелла и возбуждения поверхностного поляритона на планарной структуре // Журнал Средневолжского математического общества. 2017. Т. 19. № 3. С. 73–81.

А.Ф. ЗАЦЕПИН¹, А.Н. КИРЯКОВ¹, Д.А. ЗАЦЕПИН^{1,2},
Н.В. ГАВРИЛОВ³

¹Уральский Федеральный Университет (УРФУ), Екатеринбург, Россия

²Институт Физики Металлов (ИФМ УРО РАН), Екатеринбург, Россия

³Институт Электрофизики (ИЭ УРО РАН), Екатеринбург, Россия

ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ИОНАМИ МЕДИ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ

Изучены электронно-оптические характеристики модифицированных ионами меди при различном флюенсе прозрачных керамик MgAl_2O_4 . Ионная бомбардировка стимулирует образование оптически активных центров, связанных с дефектами в анионной и катионной подрешетках. При дозах свыше $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в матрице образуются наночастицы меди, с характерным поглощением электромагнитного излучения по механизму плазмонного резонанса.

A.F. ZATSEPIN¹, A.N. KIRYAKOV¹, D.A. ZATSEPIN^{1,2},
N.V. GAVRILOV³

¹Ural Federal University (URFU), Yekaterinburg, Russia

²Institute of Metal Physics (IMP UB RAS), Yekaterinburg, Russia

³Institute of Electrophysics Ural Branch of Russian Academy of Sciences
(IEP UB RAS), Yekaterinburg, Russia

COPPER ION PLASMA MODIFICATION OF MAGNESIUM- ALUMINUM SPINEL OPTICAL CERAMIC

Electron-optical characteristics of modified transparent MgAl_2O_4 ceramics by copper ions with different fluence were studied. Ion bombardment stimulates the formation of optically active centers associated with defects in the anion and cation sublattices. At fluence of more than $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, copper nanoparticles are formed in the matrix, with a characteristic absorption of electromagnetic radiation by the plasmon resonance mechanism.

С момента получения прозрачных керамик алюмомагниевои шпинели методами горячего прессования, этот материал интенсивно исследуется ввиду высокой радиационной стойкости, жаропрочности, отсутствия двулучепреломления и т.д. Радиационные методы окраски, в том числе ионная имплантация, не оказывают негативного влияния (распухания материала, помутнение) на матрицу. Таким образом можно легировать про-

зрачные керамики алюмомагниевого шпинели различными ионами, в зависимости от требуемых характеристик. В настоящей работе выполнено исследование электронно-оптических свойств прозрачной керамики MgAl_2O_4 полученной методом горячего прессования стехиометрического нанопорошка. Образец был разрезан на несколько частей и модифицирован ионами Cu^- флюенсом от 5×10^{15} до $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ с ускоряющим напряжением 30 кВ. Для аттестации образцов, а также определения электронно-оптических параметров использовались методы оптического поглощения, фотолюминесценции, электронного парамагнитного резонанса, XPS – анализ.

Модификация прозрачной керамики MgAl_2O_4 методом ионной имплантации ионов Cu^- приводит к возникновению в анионной подрешетке агрегатных дефектов кислорода способных локализовать электроны с образованием оптически-активных центров F_2 , F_2^+ типа, рис.1. Рост флюенса ведет к разрушению агрегатных дефектов, сохраняя точечные анионные вакансии с двумя захваченными электронами F – центр. В катионной подрешетке ионная имплантация стимулирует образование дефектов катионного перемешивания, при которых ион Mg^{2+} выбивается в позицию иона Al^{3+} и наоборот (ADs – антисайт дефекты). Такие дефекты могут выступать в качестве ловушек носителей заряда. Ионы меди при флюенсе $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и больше образуют наночастицы, которые находясь в диэлектрике способны поглощать электромагнитное излучение по механизму поверхностного плазмонного резонанса [1].

Таким образом показано, что, контролируя характеристики модификации прозрачной керамики MgAl_2O_4 ионами Cu^- можно управлять дефектностью анионной и катионной подрешеток матрицы, а также инициировать рост наночастиц меди в приповерхностном слое керамики.

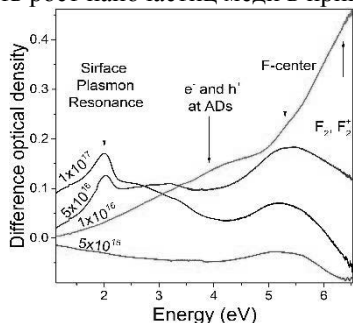


Рис. 1. Разница спектров оптического поглощения необлученного и модифицированных образцов MgAl_2O_4 керамики.

Список литературы

- [1] Kishimoto N., et al. // Nucl. Ins. and Met. in Phys. Res. Sec. B. 2000. Vol 166. PP. 840-844.

З.А. ИСАХАНОВ, З.Э. МУХТАРОВ, Б.Э. УМИРЗАКОВ,
Ж.Ш. СОДИКЖАНОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЭОС И ВИМС

С использованием метода ВИМС и ОЭС определены концентрации поверхностных атомов для очищенных и стимулированных имплантацией ионами Cs^+ и последующим нагревом в высоком вакууме образцов Cu и Al.

Z.A. ISAKHANOV, Z.E. MUKHTAROV, B.E. UMIRZAKOV,
J.SH. SODIKJANOV

*Institute of ion-plasma and laser technologies of the AS of Uzbekistan,
Tashken, Uzbekistan*

COMPARATIVE QUANTITATIVE ANALYSIS OF SURFACE COMPOSITION OF INDUSTRIAL SAMPLES OF REFRACTORY METALS BY AES AND SIMS

By SIMS and AES the concentrations of surface atoms have been determined for Cu and Al samples that were cleaned, then stimulated by Cs^+ ion implantation and subsequently heated in high vacuum.

В работе с использованием метода ВИМС отрицательных ионов стимулированной имплантацией ионами Cs^+ и нагревом исследовались элементный состав поверхности Cu и Al. В таблице приведены концентрации поверхностных атомов для очищенных в вакууме образцов Cu и Al, определенных методами ВИМС и оже-электронной спектроскопии. Видно, что ВИМС позволяет не только определить концентрации атомов с высокой точностью, чем ЭОС, но и дает возможность обнаружить малоколичественные примесные атомы, который невозможно регистрировать методом ЭОС. Установлены оптимальные условия ионной имплантации и отжига для стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии, когда ВОИЭ становится максимальной и стабильной на достаточно долгое время [1].

Метод	Концентрация атомов основных и примесных элементов, в ат.%								
Cu	Cu	P	S Cl	C Ca	O Fe	Ni Ag	Mn Se	As Pb	Sn Zn
ОЭС	97,1	0,2	0,19 0,018	1,1 0,3	0,5 0,36	0,25			
ВИМС	99,6	0,0019	0,0032	0,1 0,01	0,015 0,0034	0,0014 0,003	0,001 0,0015	0,0018 0,0024	0,0013 0,0028
Al	Al	Fe	Zn Ti	Mn Si	Cr Cu	Mg O	C		
ОЭС	99,424	0,330	0,032 0,015	0,025 0,123	0,020	0,030			
ВИМС	99,82	0,063	0,045 0,007	0,005 0,042	0,006 0,003	0,005 0,003	0,002		

На основе вышеизложенного при определенных условиях можно проводить количественный анализ элементного состава исследуемых образцов.

При определении концентрации атомов различных элементов были измерены интенсивности пиков отрицательных ионов всех элементов обнаруженных в образцах. Например, для меди концентрация атомов различных элементов определились по формуле

$$\Sigma I^{-} = I_{Cu}^{-} + I_{Fe}^{-} + I_{Zn}^{-} + I_{Si}^{-} + I_{Ti}^{-} + I_{Mg}^{-} + \dots$$

Приравняв сумму интенсивностей этих пиков к 100%, можно найти количество интересующей нас примеси, например, примеси железа (X) в медном образце с помощью формулы

$$X = (I_{Fe}^{-} / \Sigma I^{-}) \cdot 100\%$$

Результаты расчета показали, что концентрация железа в меди равна 0.0027 атом %.

Список литературы

- [1] Isakhanov Z.A., Mukhtarov Z.E., Umirzakov B.E., Ruzibaeva M.K. // Technical Physics. 2011. Vol. 56. № 4. PP. 546-549.

Е.А. ИСУПОВА, В.А. ИВАНОВ, П.В. АНДРЕЕВ, М.А. ФАДДЕЕВ
*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Россия*

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЯДА КРИСТАЛЛОВ КТР С ПРИМЕСЯМИ

Получены кристаллы концентрационных рядов $\text{KTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{OPO}_4$, $\text{KTi}_{1-x}\text{Hf}_x\text{OPO}_4$ и $\text{KTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{OPO}_4$ с содержанием примесей в шихте $0 < y < 0.3$, а также чистые кристаллы при различном составе шихты. Исследован фазовый и элементный состав полученных кристаллов, определен коэффициент распределения примесей в кристаллах КТР, проведены исследования их нелинейно-оптических свойств.

Е.А. ISUPOVA, V.A. IVANOV, P.V. ANDREEV, M.A. FADDEEV
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

GROWTH AND RESEARCH OF THE SERIES OF DOPED KTP CRYSTALS

A series of $\text{KTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{OPO}_4$, $\text{KTi}_{1-x}\text{Hf}_x\text{OPO}_4$ and $\text{KTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{OPO}_4$ crystals with concentration of doped element in the mixture in a range from 0 to 0.3 were grown. Also we have grown pure KTP crystals from the different starting compositions. X-ray phase analysis and elemental analysis were carried out. Nonlinear optical properties of the crystals are studied. The distribution coefficients of impurities in the KTP crystals are determined.

Кристаллы титанил фосфата калия (КТР) с примесями выращивались из раствора в расплаве (flux-метод) методом спонтанной кристаллизации. В качестве исходного состава шихты для выращивания примесных кристаллов был выбран один из составов, исследованных в [1, 2]: 42 мол.% K_2O , 14 мол.% P_2O_5 , 14 мол.% TiO_2 , 30 мол. % WO_3 . Примесь ZrO_2 , HfO_2 или Nb_2O_5 замещала обусловленную стехиометрией часть оксида TiO_2 так, что их суммарная молярная доля оставалась равной 14 мол. %. Вещество кристаллизовалось на платиновой проволоке, помещаемой в платиновый тигель. Также выращивались чистые кристаллы КТР при различном соотношении $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ в шихте как при наличии 30 мол. % WO_3 , так и без него. Выращенные кристаллы отмывались в горячей воде от осевших на них незакристаллизовавшихся остатков раствор-расплава. В результате были получены ряды кристаллов $\text{KTi}_{1-x}\text{Me}_x\text{OPO}_4$, (Me – Hf, Zr, Nb) с концентрацией примесей в шихте в интервале от 0 до 0.3, с пере-

менным шагом, а также чистые кристаллы КТР (более 40 образцов). Полученные образцы кристаллов перетирались в порошок в агатовой ступке.

Для идентификации выращенных фаз проводился рентгеновский фазовый анализ на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (излучение Cu-K α). Фазовый анализ показал, что все образцы однофазные, близкие по структуре к чистому КТР (PDF №00-035-0802), но при этом наблюдалось смещение дифракционных пиков в область меньших углов. Расчет показал, что объем элементарной ячейки возрастает с увеличением доли замещения атомов Ti атомами Hf, Zr и Nb. Полученные результаты коррелируют с известными данными об ионных радиусах катионов Ti⁺⁴, Hf⁺⁴, Zr⁺⁴ и Nb⁺⁵ (0.68, 0.78, 0.79, 0.69 Å соответственно) [3-5], а значит можно сделать вывод, что примеси встраиваются в структуру кристаллов.

Для определения относительного содержания титана и примеси в выращенных кристаллах проводился элементный анализ на рентгенофлуоресцентном спектрометре последовательного типа (Shimadzu LabCenter XRF-1800) и на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (Prodigy High Dispersion ICP, Teledyne Leeman Labs). Оба метода элементного анализ показали, что в исследуемых кристаллах количество циркония увеличивается с ростом его содержания в шихте вплоть до 0.07, гафния до 0.05, далее их количество в пределах погрешностей не меняется. Зависимость количества ниобия в выращенных кристаллах от его содержания в шихте можно разбить на два линейных участка с границей при его содержании в шихте $y = 0.09$. Значения, полученные двумя методами, совпадают в пределах погрешностей. Рассчитан коэффициент распределения примесей по линейным участкам зависимостей их концентрации в кристалле от концентрации в шихте. Среднее значение для Zr составляет 1.64 ± 0.11 , Hf 2.37 ± 0.11 , Nb 0.43 ± 0.05 .

Проведено исследование нелинейно-оптических свойств данных серий кристаллических образцов.

Список литературы

- [1] Iliev K. et al. // J. of Crystal Growth. 1990. Vol. 100. № 1–2. PP. 225–232.
- [2] Shumov D.P. et al. // Cryst. Res. Tech. 1990. Vol. 25. № 11. PP. 1245–1250.
- [3] Novikova E.N. et al. // Cryst. Reports. 2009. Vol. 54. № 2. PP. 219–227.
- [4] Орлова Е.И. и др. // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 3. С. 440–447.
- [5] Alekseeva O.A. et al. // Cryst. Reports. 2003. Vol. 48. № 2. PP. 205–211.

П.Ф. КАРЦЕВ¹, И.О. КУЗНЕЦОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²АО НИКИЭТ имени Н. А. Доллежаля, Москва

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОТВАРФА- ТЕЙЛОРА ДЛЯ РЕЛАКСАЦИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ВТСП

Исследуется процесс релаксации возбуждения в сверхпроводнике после воздействия ультракороткого лазерного импульса. Проводится моделирование кинетики системы частиц при помощи квантового уравнения Больцмана для определения коэффициентов более простой феноменологической модели Ротварфа-Тейлора. Обсуждаются подробности алгоритма моделирования.

P.F. KARTSEV¹, I.O. KUZNETSOV²

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

²N.A. Dollezhal Scientific Research and Design Institute of Energy Technologies (NIKIET), Moscow, Russia

MICROSCOPIC CALCULATION OF COEFFICIENTS FOR PHENOMENOLOGICAL ROTHWARF-TAYLOR MODEL FOR HTSC EXCITATION RELAXATION

The relaxation of superconductor excited by an ultrashort laser pulse is studied. The system kinetics is simulated using the quantum Boltzmann equation which allows to determine the coefficients of the simpler phenomenological model of Rothwarf and Taylor. The details of the simulation are discussed.

Исследуется процесс релаксации возбуждения в сверхпроводнике после воздействия фемтосекундного лазерного импульса [1]. Основным интерес представляют характерные времена разных стадий процесса, влияние на них параметров системы и импульсного воздействия. Следует учесть, что в данном случае имеется несколько подсистем: куперовские пары (бозоны), элементарные возбуждения (фермионы) и высокочастотные фононы (бозоны).

Кинетика сверхпроводника, возбужденного фемтосекундным лазерным импульсом, может быть описана при помощи феноменологической модели Ротварфа-Тейлора (РТ) [2], дающей временные зависимости полных концентраций квазичастиц (QP) и высокоэнергетических фононов

(НЕР). Данный подход представляется перспективным, однако значения коэффициентов в феноменологической модели требуют определения.

В данной работе проводится моделирование кинетики данной системы для определения коэффициентов упрощённой модели. Используется разработанный ранее численный алгоритм для моделирования кинетики взаимодействующей бозе-системы при помощи квантового уравнения Больцмана (QBE) на конечной решётке импульсов [3]. Для заданного начального распределения частиц по импульсам $n_k(t=0)$ рассчитывается эволюция $n_k(t)$. Сравнение интегральных концентраций частиц с результатами модели Ротварфа-Тейлора даёт возможность определить значения феноменологических параметров.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-29-10024.

Список литературы

- [1] Kartsev P.F., Сборник трудов конференции UltraFastLight-2018. P.68.
- [2] Kabanov V.V., Demsar J., Mihailovic D. // PRL. 2005. Vol. 95. P. 147002.
- [3] Kartsev P.F., Kuznetsov I.O. // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 936. № 1. P. 012055

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Москва, Россия*

**НАНОСТРУКТУРНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ
ПОКРЫТИЯ Mo-Hf-Si-B И Mo-Zr-Si-B С ВЫСОКОЙ
ЖАРОСТОЙКОСТЬЮ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ
1000-1500⁰С**

Представлены результаты комплексного исследования покрытий на основе ди-
силицида молибдена, легированного бором, гафнием и цирконием

Ph.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV

*National University of Science and Technology "MISIS"
Moscow, Russia*

**NANOSTRUCTURED ION-PLASMA Mo-Hf-Si-B AND
Mo-Zr-Si-B COATINGS WITH IMPROVED OXIDATION
RESISTANCE IN TEMPERATURE RANGE OF 1000-1500⁰С**

Results of complex study of B-, Hf-, and Zr-doped MoSi₂ coatings are presented

Объёмные материалы и покрытия в системе Mo-Si-B обладают комплексом уникальных свойств, среди которых можно отметить высокие значения температуры плавления, жаростойкости, коррозионной стойкости, стойкости к термоциклированию, прочности и твёрдости, что делает их перспективными для использования в различных высокотемпературных узлах авиационной и космической техники. Известно, что введение в Mo-Si-B легирующих элементов, таких как Hf и Zr, приводит к заметному повышению механических свойств и предельных рабочих температур. Однако применительно к модифицированным поверхностным слоям и покрытиям данный подход не изучен. Целью данной работы является исследование влияния добавок Hf и Zr на структуру и свойства покрытий Mo-Si-B, полученных с помощью магнетронного распыления композиционных мишеней.

Мишени-катоды MoHfSiB и MoZrSiB с содержанием кремния около 50 ат. % были изготовлены методом горячего прессования порошка, предварительно синтезированного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) из элементных порошков. Также методом СВС была получена мишень MoSiB, для дальнейшего осаждения базовых

недопированных покрытий. Магнетронное распыление мишеней проводилось при напряжении 500 В и токе 2 А с использованием блока питания Advanced Energy Pinnacle + 5x5. В качестве модельных подложек использовались пластины Al_2O_3 , а также для ряда экспериментов - Мо, сплавы Ni-Cr и WC-Co, подложки Si и УУКМ. Для исследования жаростойкости, термической стабильности и стойкости к диффузии элементов из подложки, были проведены изотермические отжиги полученных покрытий на воздухе, в инертной атмосфере и в вакууме в интервале температур 500-1700⁰С. Структура исходных и подвернутых термической обработке покрытий исследовалась с использованием методов растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, рентгенофазового анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния и оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда. Механические свойства были измерены с помощью наноиндентирования. Были проведены высокотемпературные трибологические испытания и эксперименты по термоциклированию.

Полученные результаты показали, что покрытия обладают плотной малодефектной структурой. Содержание примесей составляет 1.6-2.8 at% О, 0.5-0.8 at % С. Толщина покрытий при времени осаждения 40 мин находится на уровне 15 мкм. Основу всех изученных покрытий составляет фаза h-MoSi₂, средний размер кристаллитов которой понижается на 5-10 нм при введении легирующих элементов. Также обнаружено формирование аморфных прослоек переменного состава. Покрытия обладают хорошей адгезионной прочностью к различным подложкам (в случае подложки WC-Co критическая нагрузка разрушения составляет 40-60 Н), что достигается за счёт интенсивной ионной очистки ионами Ag⁺ в вакуумной камере непосредственно перед нанесением покрытий. Твёрдость покрытий составляет от 23 до 30 ГПа, упругое восстановление достигает 60-70 %. Предельные температуры, при которых покрытия успешно сопротивляются окислению, составляют около 1500⁰С. Установлено что слой SiO₂, формирующийся на поверхности покрытий в процессе выдержки на воздухе обуславливает высокую жаростойкость покрытий. Введение легирующих элементов положительно сказалось на подавлении эффекта «силицидной чумы», наблюдающегося для покрытий на основе дисилицида молибдена при температурах 500-700⁰С.

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, Е.А. ЛЕВАШОВ
*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Россия*

ТВЁРДЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ Ti-Ni-Al-C-N ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ СВС-МИШЕНЕЙ В РЕЖИМЕ DCMS И HIPIMS

Представлены результаты комплексного исследования покрытий Ti-Ni-Al-C-N полученных методом магнетронного напыления в режиме постоянного тока (DCMS) и в высокоэнергетическом импульсном режиме (HIPIMS).

Ph.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV, E.A. LEVASHOV
National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

HARD WEAR-RESISTANT Ti-Al-Ni-C-N COATINGS PRODUCED BY MAGNETRON SPUTTERING OF SHS- TARGETS IN THE DC AND HIPIMS MODES

Results of complex study of Ti-Ni-Al-C-N coatings deposited by DCMS and HIPIMS modes of sputtering are presented.

Работа посвящена получению и исследованию покрытий Ti-Al-Ni-C-N, полученных путём магнетронного распыления многокомпонентной мишени TiC-20%NiAl при разном парциальном давлении азота на постоянном токе (DCMS) и в режиме высокомоощного импульсного магнетронного распыления (HIPIMS).

Мишень была получена из порошковой смеси методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Распыление мишени проводилось в Ar и газовых смесях Ar+15%N₂, Ar+25%N₂. Подготовка и подача смесей обеспечивалась системой газонапуска Multi Gas Controller 647C (MKS). С помощью блока питания Pinnacle Plus (Advanced Energy, США) на магнетрон подавался ток 2А, напряжение при этом находилось на уровне 460-530 В. Эксперименты с нанесением покрытий в режиме HIPIMS были выполнены в среде Ar с использованием блока питания TruPlasma 4002 Huttering TRUMPF при пиковых мощностях от 60 до 120 кВт. Диаметр мишени и расстояние от магнетрона до подложки составляли соответственно 12 и 8 см. Перед нанесением покрытий подложки под-

вергались ультразвуковой очистке в изопропиловом спирте. Дополнительная очистка подложек осуществлялась в вакуумной камере ионами Ag^+ с помощью ионного источника при ускоряющем напряжении 2-2.5 кВ и токе 60 мА. В качестве подложек использовался монокристаллический кремний КЭФ-4.5 (100) и сталь 40х. Исследования проводились с помощью оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда, сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Твёрдость, модуль упругости и упругое восстановление покрытий определялись с помощью нанотвердомера Nano Hardness Tester (CSM Instruments), оснащённого индентором Берковича. Для измерения коэффициента трения покрытий проводились испытания по схеме “стержень-диск” на машине трения Tribometer (CSM Instruments) при нагрузке 1 Н и скорости 10 см/с 3 мм шариком из стали 440С. Фрактографические исследования канавок износа проводились на оптическом профилометре Veeco WYKO NT1100. Адгезионная прочность покрытий определялась на установке Revetest (CSM Instruments).

Полученные результаты показали, что соотношения $\text{Ti}/(\text{C}+\text{N})$ и $(\text{Ti}+\text{C}+\text{N})/(\text{Ni}+\text{Al})$ в покрытиях составляют от 0.5 до 1.1 и от 4.3 до 8.3. Основу покрытий составляли зерна ГЦК-фазы на основе $(\text{Ti},\text{Al})(\text{C},\text{N})$ со средним размером 3 нм и ГЦК-фазы Ni_3Al с размером 15 нм. Увеличение содержания азота в покрытиях незначительно влияло на размер кристаллитов указанных фаз, однако приводило к понижению концентрации и смене преимущественной ориентировки фазы Ni_3Al . Покрытие, не содержащее азота, имело наиболее высокую твёрдость, 34 ГПа и стабильный коэффициент трения 0.255 ± 0.014 . Азотсодержащие покрытия характеризовались более низкими механическими свойствами и сильными колебаниями коэффициента трения в процессе трибологических испытаний. Скорость износа изученных покрытий составляла менее $5 \times 10^{-6} \text{ мм}^3 \text{Н}^{-1} \text{м}^{-1}$. Использование режима HIPIMS позволило повысить адгезионную прочность покрытий. При замене метода DCMS на HIPIMS наблюдался переход от адгезионного механизма разрушения покрытий к когезионному, а также некоторое снижение коэффициента трения за счёт повышения содержания фазы на основе алмазоподобного углерода в покрытиях, осаждённых методом HIPIMS. Покрытия HIPIMS обладали рабочей температурой на 100-200С выше, чем DCMS образцы, что вероятно связано с повышением плотности материала при переходе к высокомощному режиму.

Ю.В. КИСЛИНСКИЙ¹, К.И. КОНСТАНТИНЯН¹,
И.Н. ДЮЖИКОВ¹, А.М. ПЕТРЖИК¹, А.В. ШАДРИН^{1,2}

¹ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

² Московский Физико-Технический Институт, Долгопрудный, Россия

ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В ИРИДАТАХ СТРОНЦИЯ СО СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ: SrIrO₃ И Sr₂IrO₄

Иридаты стронция - материалы со спин - орбитальным взаимодействием. Мы докладываем о данных измерений проводимости и эффекта Холла в металлическом SrIrO₃ и о температурных зависимостях сопротивления в диэлектрическом Sr₂IrO₄. Модели транспорта носителей в обоих веществах обсуждаются.

Y. V. KISLINSKII¹, K.Y. CONSTANTINIAN¹, I.N. DUZHIKOV¹,
A.M. PETRZHIK¹, A.V. SHADRIN^{1,2}

¹ Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronic RAS, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

ELECTRON TRANSPORT IN STRONTIUM IRIDATES WITH SPIN - ORBIT INTERACTION: SrIrO₃ AND Sr₂IrO₄

Strontium iridates are materials with a strong spin-orbit interaction. We report on conductivity and Hall effect data in metallic SrIrO₃ and resistivity versus temperature data for dielectric Sr₂IrO₄. Models of an electron transport in both materials are discussed.

В переходах Джозефсона сверхпроводник - ферромагнетик - сверхпроводник (SFS), если F прослойка состоит из вещества со спин-орбитальным взаимодействием (SOI), сверхпроводящий эффект близости может усиливаться за счет SOI. Усиление эффекта близости предсказано теоретически за счет переноса сверхпроводящего тока триплетными куперовскими парами в ферромагнетике с SOI [1]. Зонная модель иридатов предполагает, что энергии спин-орбитального взаимодействия велики: $E_s \geq U$ - энергии Хаббарда; и если $U < 2$ eV, то иридат - металл, а если $U > 2$ eV - магнитный диэлектрик [2]. В нашей работе приводятся результаты измерений проводимости и эффекта Холла в металле SrIrO₃ и диэлектрике Sr₂IrO₄.

Компаунд SrIrO₃, полученный нами лазерной абляцией, имел удельные сопротивления порядка $\rho \approx 1$ mΩ cm [3]. "Неметаллическое" уменьшение проводимости с понижением температуры может объясняться либо моде-

люю слабой локализации, либо в модели разупорядоченного металла. Аппроксимации по этим моделям зависимостей проводимости от температуры показаны на рис. 1. Надписи LaAlO_3 , LSAT, NdGaO_3 и SrTiO_3 обозначают материалы подложек, на которые напылялись тонкие пленки. Измерения эффекта Холла показали уменьшение концентрации дырок с температурой: от $p \approx 5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ при 300 К, до $p \approx 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ при 77 К.

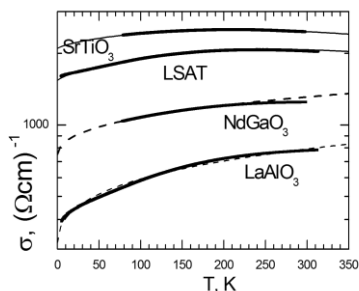


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости SrIrO_3 . Точки – эксперимент, пунктирные линии – аппроксимации в модели разупорядоченного металла, сплошные – для слабой локализации.

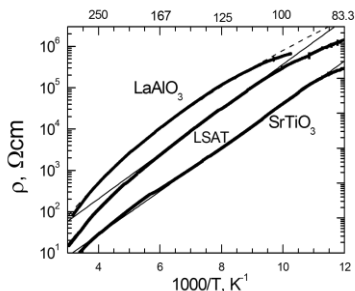


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивлений Sr_2IrO_4 . Точки – эксперимент, сплошные – аппроксимации в активационной модели, пунктирная – для прыжковой проводимости.

Проводимость пленок Sr_2IrO_4 росла с температурой экспоненциально (рис. 2). Путем аппроксимации зависимостей сопротивлений от температуры в активационной модели обнаружены признаки диэлектрической щели $\Delta E \approx 200 \text{ meV}$ [4]. Путем аппроксимации зависимостей сопротивлений от температуры в модели двумерной прыжковой проводимости для Sr_2IrO_4 получены весьма малые величины радиуса локализации $a \approx 1 \text{ nm}$ и плотности состояний на уровне Ферми $N_F \approx 10^{18} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$, что указывает на диэлектрический характер наших пленок Sr_2IrO_4 .

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ номер 18-37-00170 и номер 19-07-00143.

Список литературы

- [1] M. Alidoust, K. Halterman// Journal of Physics Condensed Matter 2015. Vol. 27, P. 235301.
- [2] M.A. Zeb, H-Y. Kee// Physical Rev. B 2012. Vol. 86, P. 085149.
- [3] Yu. V. Kisilinskii, G.A. Ovsyannikov, A.M. Petrzhik, and others// Phys. of the Solid State 2015. Vol. 57, P. 2519.
- [4] G.A. Ovsyannikov, A.S. Grishin, K.Y. Constantinian, and others// Phys. of the Solid State 2018. Vol. 60, P. 2166.

О.В. КОМЛЕВА¹, Д.В. ФОМИНСКИЙ¹, В.Н. НЕВОЛИН²,
Р.И. РОМАНОВ¹, В.Ю. ФОМИНСКИЙ¹, Н.А. РУБИНКОВСКИЙ¹
¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК MoS_x ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Исследуется эффективность реакции восстановления водорода в кислотном растворе на тонкопленочных электрокатализаторах, созданных из сульфида молибдена с аморфной и кристаллической структурой. Для получения пленок с требуемой структурой использован комплекс методов осаждения и высокотемпературного синтеза. Установлено, что каталитические свойства аморфных пленок MoS_{x>2} значительно превосходят свойства кристаллических, несмотря на характер атомной упаковки в гексагональной решетке 2H-MoS₂ фазы.

O.V. KOMLEVA¹, D.V. FOMINSKI¹, V.N. NEVOLIN²,
R.I. ROMANOV¹, V.Y. FOMINSKI¹, N.A. RUBINKOVSKI¹
¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Russia
²P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

COMPARATIVE STUDIES OF AMORPHOUS AND CRYSTALLINE THIN-FILM MoS_x CATALYSTS FOR HYDROGEN EVOLUTION REACTION

The effectiveness of the hydrogen evolution reaction in acid solution by thin-film electrocatalysts created from molybdenum sulfide with an amorphous and crystalline structure is investigated. To obtain films with the required structure, a complex of deposition and high-temperature synthesis methods was used. It has been established that the catalytic properties of amorphous MoS_{x>2} films significantly exceed that of crystalline ones, despite the features of atomic packing in the hexagonal lattice of the 2H-MoS₂ phase.

Интерес исследователей и практиков к тонким пленкам дихалькогенидов переходных металлов постоянно возрастает, что, в частности, обусловлено хорошими каталитическими свойствами определенных состояний (нано-фаз) этих материалов для эффективного получения водорода. В

работе проведен сравнительный анализ электрокаталитических свойств нано-размерных пленок сульфида молибдена с различной структурой в реакции выделения водорода из кислотного раствора.

Для исключения влияния «загрузки» электрокатализатора на эффективность выделения водорода фиксировалось время осаждения пленки Мо или MoO_{3-y} и изменялись условия сульфидирования. Применялось сульфидирование в H_2S или в парах S. Температура синтеза изменялась от 22°C (при импульсном лазерном осаждении $\text{Mo}/\text{MoO}_{3-y}$) до 800°C при термохимической обработке $\text{Mo}/\text{MoO}_{3-y}$ в парах S. Это обеспечивало получение пленок с аморфной и кристаллической структурой, соответственно. Структура пленок исследовалась методами комбинационного рассеяния и просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 1 представлены характерные результаты измерения свойств электрокатализаторов с загрузкой Мо не более 50 мкг/см^2 .

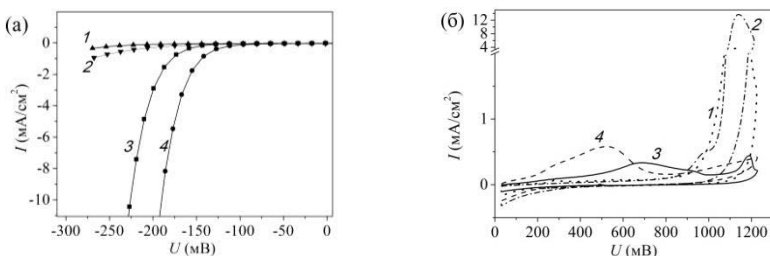


Рис. 9. Линейные (а) и циклические (б) вольтамперограммы, измеренные в $0,5\text{M H}_2\text{SO}_4$ для различных пленок MoS_x : 1 – сульфидирование пленки Мо при 800°C ; 2 – сульфидирование MoO_{3-y} при 500°C ; 3 – импульсное лазерное осаждение Мо в сероводороде при 22°C ; 4 – импульсное лазерное осаждение MoO_{3-y} в сероводороде при 22°C .

Из линейных вольтамперограмм видно, что аморфная структура обеспечивала наилучшие характеристики катализатора. Вид циклических кривых указывал на то, что окисление каталитически активных участков в полученных пленках протекало при сильно различающихся потенциалах. Для кристаллических пленок наиболее выделялся пик при больших потенциалах, что характерно для базисной ориентации, не всегда оптимальной для катализа водорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-2-00191а)

В.С. КОРОТКОВ, П.А. БРАЖНИК, А.А. КАРТАМЫШЕВ
*Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва,
Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ КОРТОКЗАМКНУТЫХ ВТСП-КАТУШЕК

Рассмотрена эволюция токов, индуцированных в короткозамкнутых соленоидах при намагничивании импульсным полем. Для описания полученных результатов применена модель, в которой учитывается параллельное соединение ВТСП со степенной ВАХ и резистивных слоев ВТСП-ленты. Полученные результаты дали возможность оценить энергетические потери при импульсном намагничивании, что позволяет сделать вывод о возрастании температуры композита при намагничивании и оценить оптимальные параметры (амплитуду, длительность) намагничивающих импульсов и толщину стабилизирующего покрытия. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными. Рассмотрены критерии применимости данного подхода к моделированию реальных ВТСП-систем.

V.S. KOROTKOV, P.A. BRAZHNİK, A.A. KARTAMYSHEV
National research center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

APPLICATION OF THE EQUIVALENT CIRCUIT TO THE MODELING OF PULSED FIELD MAGNETIZATION OF SHORT-CIRCUITED HTS-COILS

The evolution of currents induced in short-circuited solenoids under magnetization by a pulsed field is considered. To describe the results, a model is used that takes into account the parallel connection of HTS with the power CVC and resistive layers of HTS tape. The obtained results made it possible to estimate the energy losses during pulse magnetization, which allows us to conclude about the increase in the temperature of the composite during magnetization and to estimate the optimal parameters of the magnetizing pulses and the thickness of the stabilizing coating. The simulation results are compared with experimental data. The criteria for the applicability of this approach to the simulation of real HTS systems are considered.

Расчет рассеяния энергии, возникающего в жестких сверхпроводниках второго рода при движении вихрей Абрикосова, представляет актуальную задачу как с точки зрения определения оптимальных условий использования сверхпроводников в практических приложениях, так и с точки зрения

обнаружения новых термо-электродинамических эффектов в нелинейных средах.

Подходы, позволяющие описывать рассеяние энергии в сверхпроводниках второго рода, как правило, связаны с интегрированием системы уравнений Максвелла на дискретной пространственно-временной сетке с помощью метода конечных разностей или конечных элементов. Данный метод успешно применяется для расчета потерь в сверхпроводниках на переменном токе или при намагничивании импульсным методом [1].

В последние десятилетия развивается альтернативный подход к описанию электродинамики высокотемпературных сверхпроводников в переменных магнитных полях и на переменных токах [2]. Замена сплошных сверхпроводящих сред дискретными элементами с известной вольт-амперной характеристикой позволяет значительно упростить расчетную задачу и сократить время расчетов, в особенности для систем с большим количеством витков. Границы применимости эквивалентных электрических схем для расчета потерь требуют пристального анализа.

В настоящей работе представлены результаты моделирования эволюции экранирующих токов и энергетических потерь с помощью эквивалентной электрической схемы при импульсном намагничивании многовитковой короткозамкнутой катушки со стабилизирующим покрытием. Модель учитывает зависимость критического тока сверхпроводника от внешнего поля, определяемую соотношением Кима-Андерсона. С помощью модели рассчитана зависимость величины остаточного поля от амплитуды импульсного поля. Применение модели позволяет на основании вычислений определить оптимальную амплитуду импульсного намагничивания для заданной толщины медного покрытия, количества витков и параметра BAH сверхпроводника.

Результаты вычислений сравнивались с результатами эксперимента по импульсному намагничиванию короткозамкнутых катушек намотанных коммерческой лентой SuperPower с медным покрытием.

Список литературы

- [1] Ainslie M.D., Fujishiro H., Ujiie T. and others, Modelling and comparison of trapped fields in (RE)BCO bulk superconductors for activation using pulsed field magnetization // Supercond. Sci. Technol. 2014. Vol. 27. P. 065008.
- [2] Sjoström M., Dutoit B., Duron J., Equivalent circuit model for superconductors // IEEE transactions on applied superconductivity. 2003. Vol. 13. №. 2. PP. 1890-1893.

И.Н. КОЦ, В.С. КЛИМИН, В.В. ПОЛЯКОВА, А.А. РЕЗВАН,
О.А. АГЕЕВ

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ,
Таганрог, Россия*

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР КОМБИНИРОВАНИЕМ МЕТОДОВ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены экспериментальные исследования комбинирования методов фокусированных ионных пучков и плазмохимического травления. Исследованы некоторые параметры, влияющие на вертикальный размер получаемых структур. Установлено, что при увеличении количества проходов ионного пучка и времени травления в плазме, высота полученных структур увеличилась до 255 нм.

I.N. KOTS, V.S. KLIMIN, V.V. POLYAKOVA, A.A. REZVAN,
O.A. AGEEV

*Institute of Nanotechnology, Electronics and Equipment Engineering of SFEDU,
Taganrog, Russia*

NANOSCALE STRUCTURES FORMATION BY COMBINING METHODS OF FOCUSED ION BEAMS AND PLASMA- CHEMICAL PROCESSING

Experimental studies of combining the methods of focused ion beams and plasma chemical etching have been carried out. Some parameters affecting the vertical size of the obtained structures are investigated. It was found that with an increase in the number of ion beam passes and etching time in the plasma, the height of the obtained structures increased to 255 nm.

В настоящее время широко используются методы оптической и электронно-лучевой литографии для формирования структур с нанометровыми размерами. Однако данные методы требуют проведения дополнительных операций. Метод фокусированных ионных пучков основан на взаимодействии ускоренных ионов с поверхностью твердого тела. Данный метод не требует применения различного рода резистов, потому что взаимодействие происходит сфокусированным пучком, который перемещается программой управления. Метод плазмохимического травления основан на взаимодействии ионизированного рабочего газа с поверхностью мате-

риала. Использование комбинации данных методов позволяет получить наноразмерные структуры без использования литографии.

Обработка фокусированным ионным пучком галлия проводилась на подложке кремния КЭФ (001) на растровом электронном микроскопе с ионной колонной Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды). Встроенными средствами управления микроскопом был сформирован шаблон размером 500x500 нм. По данному шаблону при минимальных параметрах фокусированного ионного пучка Ga^+ были обработаны области таким образом, чтобы травление было минимальным. Количество проходов ионного пучка варьировалось от 10 до 100. Вслед за этим проводилась плазменная обработка при мощностях $W_{ICP}=200$ Вт, $W_{RIE}=15$ Вт, потоках $Ar=100$ см³/мин, $SF_6=10$ см³/мин. Время плазменной обработки было 30 и 120 сек. Затем образец был исследован методом атомно-силовой микроскопии на зондовом микроскопе Ntegra Vita (ЗАО НТ-МДТ, Россия).

В результате эксперимента были получены наноразмерные структуры с различной высотой до 255 нм (рис.1).

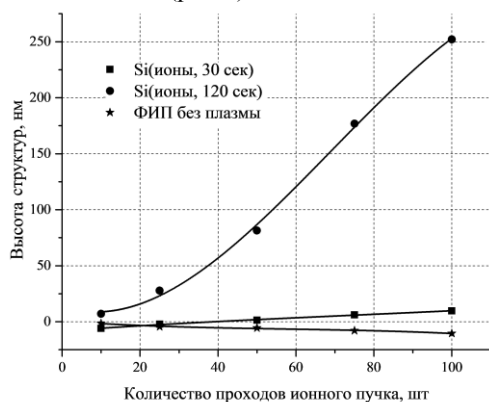


Рис. 1. Экспериментальная зависимость высоты полученных структур от количества проходов ионного пучка по шаблону

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при большем воздействии ионного пучка на поверхность кремния, маскирующие свойства проявляются сильнее. Предположительно, это связано с увеличением внедренных ионов галлия в поверхность кремния.

Работа проводилась за счет гранта РНФ №15-19-10006 с использованием оборудования научно образовательного центра и центра коллективного пользования «Нанотехнологии».

А.Е. КРЮКОВА, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ
ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

ПОИСК РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ ПУТЕМ КОМБИНИРОВАНИЯ МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ДАННЫХ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ ОТ РАСТВОРА КРЕМНЕЗОЛЯ

Исследована возможность восстановления решения задачи определения объемных распределений частиц по размерам для кривой малоуглового рассеяния от раствора кремнезоля с помощью градиентных методов минимизации для двухкомпонентной модели сферических полидисперсных частиц в сочетании с методом симулированного отжига. Результаты сопоставлены с данными, полученными при обработке с использованием только градиентных методов.

A.E. KRYUKOVA, P.V. KONAREV, V.V. VOLKOV
FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia

SEARCHING PARTICLE VOLUME SIZE DISTRIBUTIONS BY COMBINATION OF MINIMIZATION METHODS ON THE EXAMPLE OF SMALL-ANGLE SCATTERING FROM SILICASOL SOLUTION

The possibility of reconstructing the particle volume size distributions for a small-angle scattering curve from a silicasol solution using gradient minimization methods for a two-component model of spherical polydisperse particles in combination with the simulated annealing method was investigated. The results were compared with the analysis performed using only gradient methods.

Методом малоуглового рассеяния (МУР) исследуются как монодисперсные растворы белков, так и полидисперсные системы (смеси белков, наноэмульсий, наночастиц), а также произвольные конденсированные системы (нанокмполитов, гелей, аэрозолей, полимеров, сплавов, мезопористых материалов и т.п.). На сегодняшний день метод МУР является одним из эффективных структурных методов исследования.

В качестве объекта исследования в работе был выбран раствор кремнезоля, состоящий из двух типов сферических частиц [1, 2]. Для нахождения структурных параметров системы (средних радиусов частиц, их полидисперсностей и объемных долей) кривая МУР от кремнезоля была обрабо-

тана программой MIXTURE [3], входящей в состав широко используемого программного пакета ATSAS по обработке данных МУР [4].

Ранее для анализа МУР данных от раствора кремнезоля использовался только градиентный метод минимизации: метод переменной метрики в варианте Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно с простыми ограничениями на параметры, реализованный в программе MIXTURE. Были получены диапазоны устойчивого приближения для каждого из параметров системы при варьировании одного или одновременно двух из них [5]. Полученные результаты качественно коррелируют с данными, полученными для теоретических модельных систем из двух сферических полидисперсных частиц с узкими распределениями по размерам [6], тем самым подтверждая справедливость использования такого подхода для реальных экспериментальных данных.

В данной работе рассматривалась возможность поочередного использования разных алгоритмов минимизации: градиентного спуска и метода симулированного отжига. Предполагалось, что это может улучшить возможности восстановления распределений частиц по размерам. Действительно, такой подход позволил расширить границы параметров, при старте с которых могут быть найдены истинные значения системы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-32-00059 мол_a).

Список литературы

- [1] Asadchikov V.E., Volkov V.V., Volkov Yu.O. et al. // JETP Letters. 2011. Vol. 94. №7. PP. 585-587.
- [2] Tikhonov A.M., Asadchikov V.E., Volkov Yu.O. et al. // JETP Letters. 2016. Vol. 104. №12. PP. 873-879.
- [3] Konarev P.V., Volkov V.V., Sokolova A.V. et al. // J. Appl. Cryst. 2003. Vol. 36. PP. 1277-1282.
- [4] Petoukhov M.V., Franke D., Shkumatov A.V. et al. // J. Appl. Cryst.. 2012. Vol. 45. PP. 342-350.
- [5] Kryukova A.E., Kozlova A.S., Konarev P.V. et al. // Cryst. Reports. 2018. Vol. 63. № 4. PP. 531-535.
- [6] Kryukova A.E., Konarev P.V., Volkov V.V. // Cryst. Reports. 2018. Vol. 63. № 1. PP. 26-31.

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

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МАТЕРИАЛАХ

Представлены результаты исследований процессов формирования полос локализованной деформации в металлических материалах с учетом дипольных эффектов и без. Разработан численный алгоритм и на его основе проведено математическое моделирование данных процессов. Изучены статистические особенности процесса самоорганизации полос локализованной деформации и получены соответствующие законы распределения.

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

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

MATHEMATICAL MODELING OF PLASTIC FLOW LOCALIZATION IN MATERIALS UNDER DEFORMATIONS

We present the results of numerical simulation of plastic flow localization processes in metallic materials taking into account dipolar effects. Starting from mathematical model we present numerical algorithm that allows one to simulate the localization process. Using this algorithm, the statistical features of the self-organization processes are studied and corresponding distribution laws are obtained.

Исследование процессов локализации пластической деформации в ряде технологически значимых металлических материалах, понимание причин их отказа и разрушения является крайне актуальной задачей, возникающей перед современной наукой. Это обусловлено тем, что данные процессы имеют место в различных отраслях и сферах человеческой деятельности и наблюдаются в обрабатывающей, атомной, военной и космической промышленности. Более того, с момента развития технологий обработки материалов, появляются новые установки, при помощи которых удается достичь значительных значений скоростей деформации, что позволяет исследовать процессы на качественно новом уровне. Развитие методов высокоскоростной деформации выдвигает ряд важнейших проблем, среди которых, прежде всего, отметим процессы образования полос локализованной деформации в материалах при подобного рода нагружении, которые и являются предметом исследования в данной работе.

Без сомнения, одним из эффективнейших методов исследования данного физического процесса является экспериментальный подход. Однако наряду с этим, данный подход является и более ресурсоемким. В этой связи, исследование процессов локализации пластической деформации предлагается строить с использованием численного подхода.

В настоящем докладе приведены результаты исследования процессов формирования полос локализованной деформации в низкоуглеродистой стали марки НУ-100 и бескислородной меди. В частности, в работе представлена нелинейная математическая модель, описывающая процессы образования полос локализованной деформации в материалах при высокоскоростных сдвиговых нагрузках. Данная модель учитывает процессы деформационного упрочнения материала и его термического разупрочнения. Наряду с данными эффектами в модели учтены так называемые дипольные эффекты, возникающие в случае, учета скорости деформации как независимой переменной.

Для проведения математического моделирования локализационных процессов в работе предложен численный алгоритм, основанный на методе расщепления по физическим процессам с применением динамически-адаптивной пространственной сетки. Проведено тестирование данного алгоритма и показана его эффективность.

Проведенное исследование может быть разделено на две части. В первой части обсуждаются результаты моделирования процессов локализации без учета дипольных эффектов [1, 2]. Вторая часть посвящена исследованию процессов локализации в дипольных материалах, в рамках которой основное внимание уделялось исследованию влияния дипольных эффектов на процесс самоорганизации полос локализованной деформации [3]. В работе установлены характерные особенности процесса. В частности, проведено статистическое исследование и получены законы распределения ширины образовавшихся структур и расстояния между ними.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-6044.2018.1.

Список литературы

- [1] Kudryashov N.A., Muratov R.V., Ryabov P.N. // Appl. Math. Comp. 2018. Vol. 338. P. 164.
- [2] Kudryashov N.A., Ryabov P.N., Muratov R.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 788.
- [3] Kudryashov N.A., Ryabov P.N., Zakharchenko A.S. // J. Mech. Phys. Sol. 2015. V. 76. P. 180

В.С. ЛИТВИН¹, В.А. УЛЬЯНОВ², В.Г. СЫРОМЯТНИКОВ²,
Д.А. БУЧНЫЙ^{1,3}, А.А. СТОЛЯРОВ¹, Д.Н. ТРУНОВ¹,
С.Н. АКСЕНОВ¹, В.Н. МАРИН¹, С.И. ПОТАШЕВ¹,
Р.А. САДЫКОВ¹

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский Институт»,
Гатчина, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПЕРВЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА УСТАНОВКЕ «ГОРИЗОНТ» НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ НЕЙТРОНОВ ИН-06 ИЯИ РАН

Приводятся результаты рефлектометрического эксперимента на установке «Горизонт» (нейтронном рефлектометре-малоугловом спектрометре), на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН, с тестовым образцом — нейтронным суперзеркалом NiMo/Ti ($m = 2$). Также проведено Монте-Карло моделирование работы данной установки. На нейтронном рефлектометре «Горизонт» планируется проводить тестирование нейтронных зеркал, предназначенных для создания новых экспериментальных нейтронных установок на реакторе «ПИК».

V.S. LITVIN¹, V.A. ULYANOV², V.G. SYROMYATNIKOV²,
D.A. BUCHNYI^{1,3}, A.A. STOLYAROV¹, D.N. TRUNOV¹,
S.N. AXENOV¹, V.N. MARIN¹, S.I. POTACHEV¹, R.A. SADYKOV¹

¹Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia

²Petersburg Nuclear Physics Institute of NRC Kurchatov Institute, Gatchina, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

FIRST REFLECTOMETRIC EXPERIMENTS AT THE INSTRUMENT “GORIZONT” AT THE SPALLATION NEUTRON SOURCE IN-06 OF INR RAS

The results of the reflectometric experiment on the GORIZONT neutron reflectometer-SANS instrument, on the pulsed neutron source IN-06 of the INR RAS, with a test sample - the neutron supermirror NiMo/Ti ($m = 2$) are presented. A Monte-Carlo simulation was also performed. It is planned to use this instrument testing of neutron mirrors intended for new neutron experimental facilities at the PIK reactor.

Установка «Горизонт» на импульсном источнике нейтронов ИН-06

ИЯИ РАН предназначена для исследования двумерных нанообъектов, таких как многослойные нанопленки, методом нейтронной рефлектометрии. Также установка может применяться для исследований методом малоуглового рассеяния нейтронов [1]. Проведены измерения в режиме нейтронного рефлектометра с тестовым образцом — нейтронным суперзеркалом NiMo/Ti ($m = 2$) с известными характеристиками. На Рис. 1 приведен коэффициент отражения нейтронов R от данного суперзеркала как функция длины волны нейтрона, отнесенной к углу падения, λ/Θ . Измеренное значение критической длины волны соответствует ранее полученному с точностью 5%. На установке «Горизонт» планируется проводить тестирование зеркальных пленочных образцов — суперзеркал, предназначенных для создания различных нейтронно-оптических устройств реактора ПИК НИЦ КИ – ПИЯФ. Эти измерения требуются для отработки и оптимизации новых методов изготовления суперзеркал. Также с помощью Монте-Карло моделирования получены зависимости разрешающей способности установки при различной коллимации.

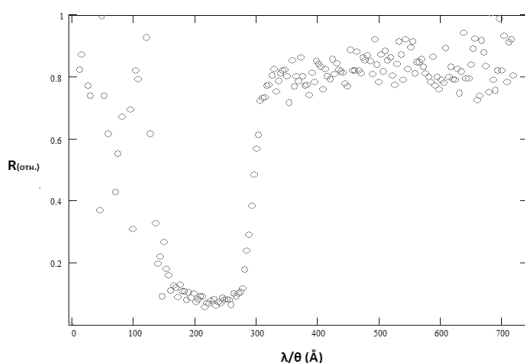


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения нейтронов от тестового образца суперзеркала NiMo/Ti ($m = 2$) как функция λ/Θ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение №14.607.21.0194 от 26.09.2017 г., RFMEFI60717X0194.

Список литературы

- [1] Litvin V.S., Trounov V.A., Ulyanov V.A. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2012. Vol. 340. P. 012032.

А.В. ЛИТВИНОВ, Ю.А. КЛИШИН, Н.Н. САМОТАЕВ,
К.Ю. ОБЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МДП-СЕНСОРА МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Проведено исследование поверхности МДП-сенсора ($\text{Pd-Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$) методами электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа. Описана морфология поверхности палладиевого слоя, установлены геометрические параметры пор. В поверхности сенсора с помощью ионного пучка реализовано углубление, что позволило определить толщины напыленных слоев. С помощью рентгеноспектрального анализа методом энергетической дисперсии установлен количественный состав поверхностного слоя сенсора.

A.V. LITVINOV, Yu.A. KLISHIN, N.N. SAMOTAEV, K.Yu. OBLOV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

RESEARCH OF MIS-SENSOR STRUCTURE BY ELECTRONIC MICROSCOPY AND X-RAY ANALYSIS METHODS

The surface of a MDP sensor ($\text{Pd-Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$) was researched by electron microscopy and X-ray spectral analysis. The morphology of the palladium layer surface is described, the geometrical parameters of the pores are established. A hollow was implemented in the sensor surface using an ion beam, which made it possible to determine the thickness of the deposited layers. With the help of X-ray spectral analysis using the method of energy dispersion, the quantitative composition of the surface layer of the sensor was established.

На сегодняшний день задача измерения концентраций различных газов в воздухе остается актуальной. Перспективным решением является использование высокочувствительного и малогабаритного МДП-сенсора. Такой сенсор имеет чувствительность ко многим типам газов (по убыванию чувствительности): H_2S , NO_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$, NO , H_2 , D_2 , NH_3 , HF , SO_2 , CO , CO_2 [1].

Сенсор представляет собой МДП-конденсатор, подложкой которого служит пластина кремния, покрытая пленкой диэлектрика (SiO_2). На слой диэлектрика методом лазерного напыления наносится пленка Ta_2O_5 , а за

тем пленка затвора из каталитического металла (Pd). Структура сенсора поддерживается при постоянной температуре в интервале 80-150 °С.

Существующая модель механизма чувствительности [2] предполагает захват ловушками продифундировавших через палладий молекул газа на границе металл-диэлектрик, что приводит к перераспределению электрического поля в приповерхностном слое полупроводника и последующему изменению емкости МДП-конденсатора. Понимание морфологии поверхности и слоев структуры сенсора может дополнить существующую модель.

На ЭМ-изображении поверхности сенсора (рис. 1 а) наблюдается пористая структура палладия. Размеры пор лежат в диапазоне 5 – 15 нм, имея тенденцию сливаться в крупные поры размерами до 200 нм. Именно через эти поры молекулы газов свободно проходят до границы металл-диэлектрик.

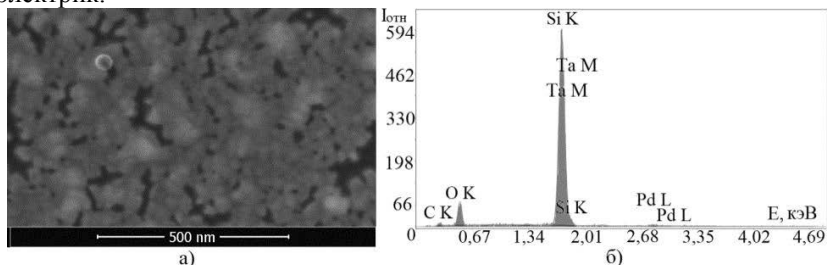


Рис. 1. ЭМ-изображение поверхности МДП-сенсора – а, энергетический спектр рентгеновского излучения – б.

По результатам рентгеноспектрального анализа (рис. 1 б) определен элементный и количественный состав (методом eZAF) приповерхностного слоя сенсора (на глубине до 1 мкм). Полученные результаты в сопоставлении с определенными по ЭМ-изображениям толщинами слоев структуры позволяют сделать вывод о возможной незначительной нехватке кислорода в слоях SiO_2 и Ta_2O_5 , что может влиять на структуру ловушек.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-79-10230). This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 18-79-10230.

Список литературы

- [1] Емелин Е.В., Николаев И.Н., Соколов А.В., Чувствительность МДП-сенсоров к концентрациям различных газов в воздухе // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 37.
- [2] Николаев И.Н., Литвинов А.В., Емелин Е.В., Механизм чувствительности МДП-сенсоров к концентрациям газов // Датчики и системы. 2006. № 7. С. 66-73.

И.В. МАЛИКОВ, В.А. БЕРЕЗИН, Л.А. ФОМИН

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов
РАН, г. Черноголовка, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА Co_2FeAl , ВЫРАЩЕННЫХ НА R- И A- ПЛОСКОСТЯХ САПФИРА ДЛЯ СПИН-ИНЖЕКЦИОННОЙ ТГц-ФОТОНИКИ

Были исследованы магнитные свойства пленок сплава Гейслера Co_2FeAl , выращенных методом импульсного лазерного осаждения в сверхвысоком вакууме на R- и A- плоскостях сапфира с подслоем тугоплавкого металла и без подслоя. Измерения магнитосопротивления пленок и магнитного строения микроструктур из этих пленок, методом магнитно-силовой микроскопии показали, что пленки, выращенные на A- плоскости обладают одноосной анизотропией в плоскости, в то время как пленки, выращенные на R-плоскости, демонстрируют двuosную магнитную анизотропию. Использование данных пленок в магнитных переходах может увеличить интенсивность спин-инжекционного ТГц излучения при протекании через них тока.

I.V. MALIKOV, V.A. BEREZIN, L.A. FOMIN

*Institute of microelectronics technology and high purity materials RAS, Chernogolovka,
Russia*

STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES OF THE Co_2FeAl HEUSLER ALLOY FILMS GROWN ON R- AND A-PLANE OF SAPPHIRE FOR SPIN-INJECTION THz PHOTONICS

The magnetic properties of the Co_2FeAl Heusler alloy films, grown by pulsed laser deposition in ultrahigh vacuum on the R- and A- sapphire planes with a refractory metal seed layer and without it, were investigated. Measurements of the magnetoresistance of the films and the magnetic structure of the microstructures fabricated from the films using magnetic force microscopy showed that films grown on the A-plane have uniaxial anisotropy in the plane, while films grown on the R-plane show a biaxial magnetic anisotropy. The use of these films in magnetic junctions can increase the intensity of the spin-injectional THz radiation when current flows through them.

Известно, что некоторые из сплавов Гейслера, например сплав Co_2FeAl обладают свойством половинного металла [1]. Это означает 100% -ную поляризацию электронов проводимости по спину на уровне Ферми, что позволяет достичь высокую плотность 100% поляризованного по спину

тока. Как было показано, спиновая инжекция в магнитных переходах вызывает спиновую неравновесность электронов проводимости, что приводит к излучательным электронным переходам между спиновыми подзонами, откуда возникла идея создания лазера, работающего в ТГц диапазоне [2]. В этом смысле сплав Гейслера интересен в качестве инжектора спин-поляризованных электронов. В данной работе тонкие пленки ферромагнитного сплава Гейслера Co_2FeAl выращивались методом импульсного лазерного осаждения на подложках монокристаллического сапфира R- и A-плоскостей с эпитаксиально выращенным подслоем тугоплавкого металла и без него. Во всех случаях магнитосопротивление пленок сильно зависит от температуры роста, демонстрируя поведение, характерное для анизотропного магнитосопротивления. Обнаружены также немонотонные зависимости морфологических и магнитных свойств пленок от температуры их роста.

В частности, коэрцитивные поля H_c и полная ширина на половине максимума пиков магнитосопротивления сначала резко возрастают, а затем снова резко уменьшаются с ростом температуры. Это свидетельствует о структурном превращении в плёнках сплава Гейслера в разных диапазонах температур роста. С помощью магнитно-силовой микроскопии в присутствии внешнего магнитного поля было изучено магнитное строение микроструктур, полученных из выращенных пленок. Пленки Co_2FeAl , выращенные на A-плоскости сапфира, обладают индуцированной ростом одноосной магнитной анизотропией (рис. 1) в отличие от ранее опубликованных результатов [1].

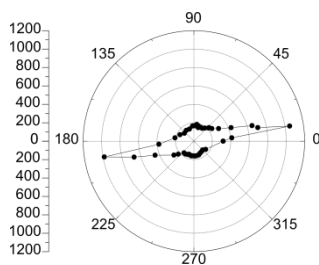


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы H_c (вертикальная шкала в Э) от угла по отношению к направлению магнитного поля в плоскости для пленки Co_2FeAl , выращенной на A-плоскости сапфира с подслоем Mo (011).

Пленки, выращенные на R-плоскости, демонстрируют двуосную магнитную анизотропию.

Список литературы

- [1] Schneider H. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. PP. 1548–1551.
- [2] Korenivski V. et al. // Europhysics Letters. 2013. Vol. 104. P. 27011.

Б.П. МИХАЙЛОВ¹, В.Я. НИКУЛИН², А.Б. МИХАЙЛОВА¹,
П.В. СИЛИН², И.В. БОРОВИЦКАЯ¹, В.Ф. ШАМРАЙ¹

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

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

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК СВЕРХПРОВОДНИКА ПРИ УДАРНО – ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ

В докладе представлены исследования влияния материалов, используемых для создания защитных экранов на установке «Плазменный фокус» при ударно-волновом воздействии плазмы по поверхности сверхпроводящих лент на основе соединения MgB_2 . В процессе исследований использованы экраны из железа, титана и меди одинаковой толщины (100 мкм). Расстояние образцов от плазменного анода равнялось 30 мм и количество ударов – 5, удары наносились с одной стороны. Критические токи установлены за счет измерения ВАХ в магнитных полях от 0,6 до 6,0 Т. При этом наиболее высокие критические токи 850 А в поперечном магнитном поле 1,0 Т получены в случае использования экрана из титана.

IMPACT OF PROTECTIVE SCREEN'S MATERIAL ON SUPERCONDUCTING CRITICAL CURRENT UNDER SHOCK- WAVE PLASMA STRIKE

B.P. MIKHAILOV¹, V.Ya. NIKULIN², A.B. MIKHAILOVA¹,
P.V. SILIN², I.V. BOROVITSKAYA¹, V.F. SHAMRAY¹

¹ *A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS, Moscow, Russia*

² *Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

The study of materials influence used to create protective screens in case of shock-wave plasma strike at the surface of MgB_2 superconducting tapes in the “Plasma Focus” installation are presented. In the process of research, screens of iron, titanium and copper of the same thickness (100 μm) were used. The distance from the samples to the plasma anode was 30 mm, the number of strikes was – 5, and the strikes were made from one side. The critical currents are determined by measuring the current – voltage characteristics in magnetic fields from 0.6 to 6.0 T. The highest critical currents of 850 A in a transverse magnetic field of 1.0 T are obtained in case of using titanium screen.

В процессе проведения экспериментов, давление аргона в камере установки изменялось от 1,6 до 1,7 Торр. Все защитные экраны имели одина-

ковую толщину $d = 0,1$ мм и поперечные размеры, необходимые для закрепления в держателе образца. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проведены в НИЦ «Курчатовский институт» при гелиевых температурах в поперечных магнитных полях от 0,6 до 6,0 Т. Наибольший ток в магнитном поле 2,0 Т достигнут при использовании экрана из Ti – 380А, в случае медного экрана в указанном поле критический ток равен 250А, а в случае железа 145 А. В исходном состоянии критический ток лент равен 150 А. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии физико-механических свойств экранов. На рис.1 представлены фотографии экранов, образцов лент MgB_2 и структуры поверхности экранов в зоне ударов. На рис.2 зависимости $J_c(B)$ лент после ударов через указанные экраны.

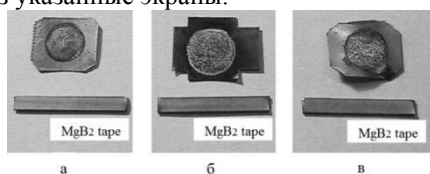


Рис.1 Структура поверхности экранов из меди -а, железа-б, титана-в, и поверхность лент MgB_2 в зоне обработки плазменными ударами на расстоянии 30 мм

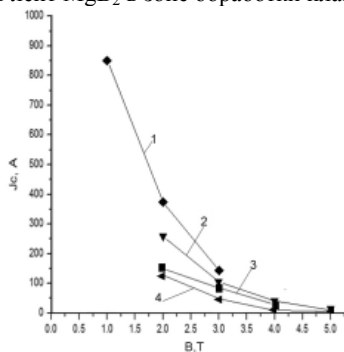


Рис. 2 Зависимости $J_c(B)$ лент в случае исходной ленты (1) и экранов из меди (2), титана (3) и железа (4).

Работа выполнялась по государственному заданию № 075-00746-19-00 и № AAAA-A17-117111470058-8.

Список литературы

- [1] Mikhailov B.P., et al. // Doklady of Physics. 2012. Vol. 57. № 2. PP. 61-63.
- [2] Mikhailov B.P., Ivanov L.I., Shamray V.F. et al. // Advanced Materials. 2009. PP. 57-60.
- [3] Mikhailov B.P., et al. // Physics of Atomic Nuclei. 2018. Vol. 81. № 11. PP.1-7.

Т.И. МОГИЛЮК¹, П.Д. ГРИГОРЬЕВ²

¹Научно-исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

²Институт Теоретической Физики имени Л.Д Ландау РАН, Черногловка, Россия

МАГНИТНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ВНУТРИСЛОЕВОЙ ПРОВОДИМОСТИ В КВАЗИДВУМЕРНЫХ МЕТАЛЛАХ

Работа нацелена на теоретическое изучение электронных свойств в сильно анизотропных слоистых проводниках, представленных широким разнообразием веществ: органическими металлами, гетероструктурами, интеркалированным графитом, слоистыми манганитами, высокотемпературными сверхпроводниками и др. Развита теория поперечного магнитосопротивления в слоистых квазидвумерных металлах. Получено аналитическое выражение для шубниковских и медленных осцилляций поперечного магнитосопротивления в самосогласованном борновском приближении [1]. Полученные результаты полезны для анализа экспериментальных данных об осцилляциях магнитосопротивления в различных сильно анизотропных квазидвумерных металлах.

T.I. MOGILYUK¹, P.D. GRIGORIEV²

¹National Research Centre "Kurchatov institute", Moscow, Russia

²L.D. Landau Institute of Theoretical Physics(RAS), Chernogolovka, Russia

MAGNETIC QUANTUM OSCILLATIONS OF IN-PLANE CONDUCTIVITY IN QUASI-TWO-DIMENSIONAL METALS

The work is aimed at the theoretical study of electronic properties in strongly anisotropic layered conductors represented by a wide variety of substances: organic metals, heterostructures intercalated with graphite, layered manganites, high-temperature superconductors, etc. The theory of transverse magnetoresistance in layered quasi-two-dimensional metals is developed. An analytical expression is obtained for the Shubnikov and slow oscillations of the transverse magnetoresistance in the self-consistent Born approximation. The results obtained are useful for analyzing experimental data on magnetoresistance oscillations in various highly anisotropic quasi-two-dimensional metals.

Магнитные квантовые осцилляции являются мощным инструментом для изучения электронной дисперсии и геометрии ферми-поверхности металлических соединений. В последние десятилетия этот инструмент активно использовался для исследования электронной структуры сильно анизотропных слоистых соединений, в том числе органических металлов, высокотемпературных сверхпроводников и т.д. В слоистых соединениях

магнитосопротивление имеет новые и полезные качественные эффекты, которые отсутствуют в почти изотропных трехмерных металлах – это, например, так называемые медленные осцилляции [1,2]. Такие осцилляции происходят от смещения двух близких частот, возникающих, например, от гофрировки поверхности Ферми из-за туннелирования электронов между слоями. Медленные осцилляции не чувствительны к размытию уровня Ферми, так как они содержат только разницу уровней Ферми, определённых интегралом межслоевого перескока t_z . Следовательно, медленные осцилляции могут быть сильнее, чем шубниковские осцилляции, и наблюдаются при гораздо более высокой температуре. Медленные осцилляции впервые наблюдались для межслоевого магнитосопротивления в органическом металле β -(BEDT-TTF) $2\text{I}Br_2$ и сначала ошибочно интерпретировались как магнитные квантовые осцилляции от малых карманов поверхности Ферми. Медленные осцилляции внутрислоевого магнитосопротивления наблюдались в трителлуридах редкоземельных металлов [3] (см. рис. 1). Мы получили [1] аналитические выражения для шубниковских и медленных осцилляций поперечного внутрислоевого магнитосопротивления в самосогласованном борновском приближении.

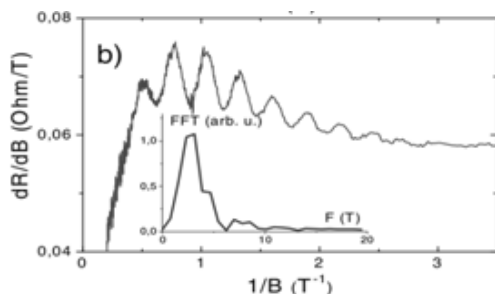


Рис. 1. Зависимость производной внутрислоевой диагональной проводимости $dR_{xx}(B)/dB$ в $GdTe_3$ от обратного магнитного поля B^{-1} ; в слабом поле $B < 2$ Т заметны медленные осцилляции. На вставке изображен Фурье-образ медленных осцилляций. Частота медленных осцилляций примерно равна 3 Т^{-1} , частота шубниковских осцилляций 40 Т^{-1} .

Работа частично поддержана РФФИ (гранты 18-02-01022, 18-02-00280, 18-32-00205, 19-02-01000).

Список литературы

- [1] Mogilyuk T.I., Grigoriev P.D. // Phys. Rev. B. 2018. Vol. 98. P. 045118.
- [2] Kartsovnik M.V., Grigoriev P.D., Biberacher W., Kushch N.D., Wyder P. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89. P. 126802.
- [3] Grigoriev P.D., Sinchenko A.A., Lejay P. et al. // Eur. Phys. J. B. 2016. Vol. 89. № 6. P. 151.

А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ,
И.А. РУДНЕВ

*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВИХРЕВУЮ СИСТЕМУ ВТСП

Проведено численное исследование отклика ВТСП на воздействие прямоугольных импульсов магнитного поля различной амплитуды и длительности. Рассчитаны временные зависимости намагниченности сверхпроводника и поля внутри него для разных параметров импульса. Рассмотрены образцы ВТСП с разными концентрациями точечных дефектов. Проведено сравнение величины отклика сверхпроводника на прямоугольные импульсы с откликом на постепенное намагничивание и размагничивание образца вдоль кривой намагниченности. Изучено поведение вихревой решетки в условиях импульсного поля с течением времени.

A.N. MOROZ, A.N. MAKSIMOVA, V.A. KASHURNIKOV,
I.A. RUDNEV

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

INFLUENCE OF PULSED MAGNETIC FIELD ON THE VORTEX SYSTEM OF HTSC

A numerical study has been conducted on the response of HTS to the square pulses of magnetic field of various amplitudes and durations. Time dependences of the magnetization of superconductor and the field inside it have been calculated for different pulse parameters. Samples of HTS with various point defect concentrations have been considered. A comparison of the values of the superconductor response to square magnetic field pulses with the response to gradual magnetizing and demagnetizing of the sample along the magnetization curve has been made. The time-dependent vortex lattice behavior has been studied in the presence of pulsed field.

На сегодняшний день существует большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных неравновесным состояниям в сверхпроводниках [1-4]. Изучение подобных состояний позволит ВТСП найти применение в электронике, например, при конструировании переключающих устройств, слабо- и сильноточных ключей и т.д. Исследуются неравновесности, создаваемые импульсными магнитными полями [1], пикосекундным лазерным воздействием [2], импульсами тока [3] и температурой [4]. Любое из указанных воздействий приведет к изменениям ди-

намики вихревой системы, которая во многом определяет транспортные и магнитные свойства ВТСП. В связи с этим вызывает интерес исследование поведения вихрей в неравновесных состояниях.

В настоящей работе в рамках модели слоистого ВТСП [5-6] исследовалось воздействие со стороны импульсов магнитного поля. Для этого были выбраны импульсы прямоугольной формы с различными амплитудами и длительностями. На рис. 1 представлены временные зависимости магнитного поля внутри ВТСП для различных концентраций точечных дефектов, в результате действия серии из трех прямоугольных импульсов амплитудой 600 Э фиксированной длительности. Было обнаружено, что величина отклика зависит от концентрации дефектов. Кроме того, она неодинакова при многократном воздействии внешнего импульса, что означает разную релаксацию вихревой системы.

Для исследования причин различий в откликах образцов были изучены вихревые конфигурации в различные моменты времени. При определенных соотношениях между амплитудой импульса и концентрацией дефектов обнаружены метастабильные вихревые состояния, приводящие к задержке отклика, пример которой приведен на рис. 1 для 300 дефектов.

Помимо прямоугольных импульсов, был рассмотрен случай постепенного намагничивания и размагничивания образца, а также случай полного перемагничивания ВТСП.

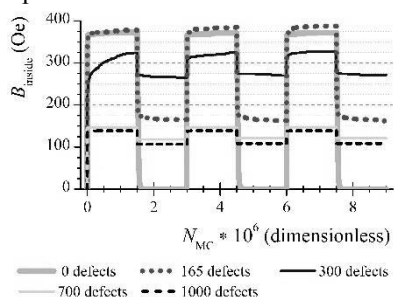


Рис. 1 Зависимости магнитного поля внутри сверхпроводника от времени (в шагах Монте Карло) для различных концентраций дефектов.

Список литературы

- [1] Oomen M.P. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. Vol. 15. № 2. PP. 1465–1468.
- [2] Gray K.E., Kampwirth R.T. // Cryogenics. 1984. Vol. 21.
- [3] Lusche R. et al. // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116 N. P. 043906.
- [4] Высоцкий В.С., Карасик В.Р., Конохов А.А., Мальгинов В.А. // Труды ФИАН. 1980. Т. 121. № 76.
- [5] Кашурников В.А., Максимова А.Н., Руднев И.А., Одинцов Д.С. // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 1457-1464.
- [6] Kashurnikov V.A., Maksimova A.N., Rudnev I.A., Odintsov D.S. // Physica C. 2016. Vol. 528. PP. 17-22.

Ж.Х. МУРЛИЕВА^{1,2}, Д.К.ПАЛЧАЕВ¹, М.Х. РАБАДАНОВ¹,
М.Э.ИСХАКОВ¹, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹

¹Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства,
г. Махачкала, Россия

КОРРЕЛЯЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $Ti_{67}Al_{33}$

На основе *in situ* исследований температурных зависимостей электросопротивления (ρ) и теплового расширения интерметаллида $Ti_{67}Al_{33}$ от 300K до 1000K показано наличие тенденции прямой корреляции коэффициентов электросопротивления (α_ρ) и объемного теплового расширения (α_v) независимо от смены типа проводимости: металлическая – полупроводниковая – металлическая в исследованном интервале температур.

Zh.Kh. MURLIEVA^{1,2}, D.K. PALCHAEV¹, M.E. ISKHAQOV¹,
S.Kh. GADZHIMAGOMEDOV¹, M.Kh. RABADANOV¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

CORRELATION OF THE TEMPERATURE COEFFICIENTS OF RESISTIVITY AND THE VOLUME THERMAL EXPANSION OF INTERMETALLIDE $Ti_{67}Al_{33}$

Based on *in situ* studies of temperature dependences of electrical resistance (ρ) and thermal expansion of $Ti_{67}Al_{33}$ intermetallic from 300K to 1000K, the trend of direct correlation between electrical resistance coefficients (α_ρ) and volumetric thermal expansion (α_v) is shown regardless of the change of conductivity type: metallic - semiconductor - metallic

Сплав вычитания $Ti_{67}Al_{33}$ относится к α_2 - фазе со структурой Ti_3Al . Особенность этой структуры в том, что для этой стехиометрии характерно возникновение дополнительной направленной межатомной связи, приводящей к сверхструктурному упорядочению, которое разрушается при слабых внешних воздействиях. Лабильность этой кристаллической структуры при термических возбуждениях решетки приводит к диффузионным фазовым переходам, связанным с перераспределением атомов по узлам при неизменной кристаллической структуре. Более того, наличие вакант-

ных узлов, характерное для сплавов вычитания усиливает этот эффект и приводит к разнообразию устойчивых структур. Перевод в равновесное состояние этих структур можно осуществлять путем соответствующей термообработки этих сплавов. Практическая значимость, таких сплавов определяется, как отмечено в [1] перспективой создания слоев с резистивной памятью. Результаты исследования таких сплавов кроме практической значимости имеют эвристическое значение.

Исследованы $\rho(T)$ и коэффициента теплового расширения (КТР) интерметаллида $\text{Ti}_{67}\text{Al}_{33}$ после закалок, отжигов от различных температур. Поликристаллический образец состава $\text{Ti}_{67}\text{Al}_{33}$ был получен индукционной плавкой при $\sim 1800^\circ\text{C}$. из титана (BT1-0) и алюминия (АВР). Размеры образца $\sim 5 \times 5 \times 80 \text{ мм}^3$. Измерения (*in situ*) $\rho(T)$ (4-х зондовый) и КТР (кварцевый dilatометр) в интервале от 300К до $\sim 1000\text{K}$ проводились одновременно на одном и том же образце, в одних и тех же условиях.

Установлено, что для исследованного нами микрокристаллического сплава со структурой Ti_3Al в отличие монокристаллического, которому свойственен полупроводниковый характер проводимости, даже в небольшом интервале температур, наблюдается смена типа проводимости с металлического на полупроводниковый и наоборот. Формирование структуры и свойств интерметаллидов, в том числе сплава $\text{Ti}_{67}\text{Al}_{33}$, определяется примерным равенством металлической и ковалентной типами связей в них. Поэтому фактор наличия межзеренных границ и эффект диффузионных фазовых переходов, видимо, сказываются на характере соответствующего поведения температурной зависимости электросопротивления для нашего образца. В результате анализа корреляции данных по температурным зависимостям электросопротивления и теплового расширения, установлено наличие тенденции прямой корреляции коэффициентов электросопротивления (α_p) и объемного теплового расширения (α_v) независимо от смены типа проводимости. Ранее нами было показано [2], что такая корреляция наблюдается для проводников претерпевающих фазовые переходы второго рода, связанные с атомными и магнитными упорядочениями. Это указывает на то, что в формировании потенциала рассеяния в проводниках определяющая роль при упорядочениях различных подсистем принадлежит особенностям изменения межатомных состояний.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № 3.5982.2017/8.9.

Список литературы

- [1] Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Исаков М.Э. и др. // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 1–4.
- [2] Мурлиева Ж.Х., Исаков М.Э., Палчаев Д.К. и др. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 5. С. 644–652.

Н.П. НЕТЕСОВА

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Россия*

ЭЛЕКТРОННАЯ ПЛАЗМЕННАЯ МОДЕЛЬ КРИСТАЛЛА ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТ

В рамках электронной осцилляционной модели энергия и параметр взаимодействия валентных электронов кристалла TGS - триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$ были рассмотрены. Для TGS температуры фазовых переходов при $T_{c1} = 2.8$ К, $T_{c2} = 101.55 \div 123.79$ К, $T_{c3} = 322.05$ К были рассчитаны.

N.P. NETESOVA

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

ELECTRON PLASMA MODEL OF CRYSTAL THREE GLYCINE SULFATE

Within the electron oscillation model the energy and interaction parameter of the valence electrons of the TGS crystal – three glycine sulfate $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$ were considered. For TGS, the phase transition temperatures at $T_{c1} = 2.8$ K, $T_{c2} = 101.55 \div 123.79$ K, and $T_{c3} = 322.05$ K are calculated.

Сегнетоэлектрическая активность кристаллов TGS - триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$ была открыта Маттиасом в 1956 г. Температура Кюри T_{c3} равна 322.2 К. Выше T_{c3} кристалл TGS имеет моноклинную симметрию и принадлежит к центросимметричному классу 2/m. Ниже T_{c3} зеркальная плоскость исчезает и кристалл принадлежит к полярной точечной группе 2 моноклинной системы.

Результаты расчетов по электронной осцилляционной модели [1] для TGS приведены в таблицах 1-2, где M – молекулярная масса, ρ - массовая плотность, s – число валентных электронов, T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} – температура фазового перехода, $\Phi^2 = 830 \bullet \rho \bullet s / M$ - квадратичная плазменная энергия, q – параметр взаимодействия, $n \bullet \sum \Phi^2$ - суммарная квадратичная энергия образующихся n молекул при разрыве валентных связей, G - молекула глицина $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4 = 1.5G_2 + H_2 + 0.5 S_2 + 2O_2$.

$$\Phi^2(\text{TGS}) = 830 \bullet 1.69 \bullet 122 / 323.3 = 529.32075471,$$

$$1.5 \bullet \Phi^2(G) = 1.5 \bullet 533.02650859 = 799.539762885, \Phi^2(H) = 66.64452473,$$

$$0.5 \bullet \Phi^2(S) = 0.5 \bullet 321.48069606 = 160.74034803, 2 \bullet \Phi^2(O) = 2 \bullet 354.9456 =$$

709.89.

Таблица 1. Параметры кристалла триглицинсульфата					
	G	H	O	S	TGS
M (g/cm ³)	75.07	1,0794		32.066	323.3
ρ (g/cm ³)	1.607	0,08667		2.07	1.69
s	30	1	6	6	122
Φ ² (eV) ²	533.02650859	66.64452473	354.9456	321.48069606	529.32075471

Таблица 2. Фазовые переходы в TGS					
Σ ₁	549.150 85197				
Σ ₂		1282.046 090125	1509.430 962885	1736.815 835645	
Σ ₃					
q1	0.963 88952				
q2		0.412 87186	0.350 67569	0.304 76504	
q3					-0.512
Tc1	2.759 77838				
Tc2		101.552 73108	114.231 74594	123.789 68471	
Tc3					322.052 65484

Расчёты проведены по уравнению кривой фазового перехода

$$T_c = 40.05687q^2 - 234.44056q + 191.51842$$

Критерий баланса энергий

$$\Phi^2(\text{TGS}) = 529.32075471 < 1.5 \bullet \Phi^2(\text{G}) = 799.539762885,$$

$$\Phi^2(\text{TGS}) = 529.32075471 < 2 \bullet \Phi^2(\text{O}) = 709.8912,$$

$$\Phi^2(\text{TGS}) = 529.32075471 > 0.5 \bullet \Phi^2(\text{S}) = 0.5 \bullet 321.48069606 = 160.74034803,$$

$$\Phi^2(\text{TGS}) = 529.32075471 > \Phi^2(\text{H}) = 66.64452473,$$

$$2 \Phi^2(\text{TGS}) = 2 \bullet 529.32075471 < n \bullet \Sigma \Phi^2.$$

Кристалл TGS при условии выполнения критерия баланса энергий, что ещё следует тщательно изучать, проходит стадии ферроэлектрического – антиферроэлектрического – сверхпроводящего состояния.

Список литературы

- [1] Netesova N. P., Oscillation electron model superconductors: phase diagram, temperature transition, isotopic shift // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10533. № 105330Z. PP. 1-11.

Д.К. ПАЛЧАЕВ¹, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹,
М.Х. РАБАДАНОВ¹, Ж.Х. МУРЛИЕВА^{1,2}, А.Э. РАБАДАНОВА¹

¹Дageстанский государственный университет, г. Махачкала, Россия

²Дageстанский государственный университет народного хозяйства,
г. Махачкала, Россия

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФИЦИЕНТЫ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ YBCO ВБЛИЗИ T_c

Показано подобие характеров поведения коэффициентов электросопротивления (α_p) и объемного теплового расширения (α_v) YBCO вблизи перехода в сверхпроводящее состояние. Обращается внимание на тенденцию стремления объема, в среднем по решетке этого сверхпроводника, к постоянному значению ниже T_c . Наноструктурирование и локальные нарушения решетки на атомарном уровне приводит к повышению температуры начала сверхпроводящего перехода.

D.K. PALCHAEV¹, S.Kh. GADZHIMAGOMEDOV¹,
M.KH. RABADANOV¹, Zh.Kh. MURLIEVA^{1,2},
A.E. RABADANOVA¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

CORRELATION OF THE TEMPERATURE COEFFICIENTS OF RESISTIVITY AND THE VOLUME THERMAL EXPANSION OF INTERMETALLIDE $Ti_{67}Al_{33}$

The similarity of the characters of the behavior of the electrical resistivity coefficients (α_p) and the volume thermal expansion (α_v) YBCO near the transition to the superconducting state is shown. Attention is drawn of aspirations of the volume in averaged over the lattice of this superconductor, to a constant value below T_c . Nanostructuring and local lattice disruption at the atomic level leads to an increase in the temperature of the onset of the superconducting transition.

Важным параметром ВТСП является температура перехода в сверхпроводящее (СП) состояние. При этом эта температура ($\sim 92K$), наблюдаемая для монокристаллического состояния $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, сохраняется и при существенном разупорядочении структуры в нанокерамике, где разупорядочение наблюдается на атомарном уровне [1], а также в аморфном состоянии [2].

Поскольку состояние системы определяется термодинамическими параметрами P , V и T , то при постоянном атмосферном давлении в T_c должна наблюдаться какая-то особенность изменения объема (V), связанная с зарядовыми упорядочениями. Поскольку переход в СП состояние является фазовым переходом второго рода, то на температурной зависимости коэффициента теплового расширения должна быть аномалия подобная той, которая наблюдается на температурной зависимости электронной составляющей теплоемкости. В результате прецизионных исследований показано [3,4], что для температурной зависимости электронной составляющей коэффициента теплового расширения существует нерегулярность, как же, как и для электронной составляющей теплоемкости. Функция $V(T)$ для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, терпит разрыв при T_c так, что до перехода в СП состояние демонстрирует насыщение дисперсионной межатомной связи в среднем по решетке, а после - возникновение доступного для изменения объема. Такое поведение характерно [5] ковалентному типу межатомной связи, приводящей к снижению плотности упаковки атомов. При этом обращает на себя внимание сходство характеров поведения коэффициентов электросопротивления (α_p) и объемного теплового расширения (α_v) для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в области СП состояние.

Помимо соответствующих нерегулярностей объемного расширения в небольшой области СП перехода, наблюдается тенденция стремления объема, в среднем по решетке YBCO, к постоянному значению ниже T_c . Это результат конкуренции сжатия решетки при снижении хаотизации колебаний атомов и повышении рыхлости упаковки атомов в результате эффекта нарастания дисперсионных сил и усиления ковалентной связи. Все это приводит к представлению о том, что силы притяжения и отталкивания между атомами в среднем по решетке YBCO для подсистемы с преимущественно ковалентными связями в СП состоянии оказываются равными.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № 3.5982.2017/8.9 и частично гранта РФФИ № 18-08-00092а.

Список литературы

- [1] Gadzhimagomedov S.Kh., Palchaeв D.K., Rabadanov M.Kh. et al. // J. Technical Physics Letters. 2016. Vol. 42. № 1. PP. 4–7.
- [2] Wells F.S., Pan A.V., X. Renshaw Wang et al. // Scientific Reports. 2015. 5: 8677. DOI: 10.1038/srep08677.
- [3] Srinivasan R., Girirajan K.S., Ganesan V. et al. // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 38. № 1. PP. 889–892.
- [4] Schnelle W., Braun E., Broicher H. et al. // Physica C. 1990. Vol. 168. PP. 465–474.
- [5] Слэтер Дж., Диэлектрики, полупроводники, металлы. М.: Изд. «МИР», 1969.

Г.В. ПАНАСОВА, С.В. САВУШКИНА, А.М. БОРИСОВ,
А.А. АШМАРИН, И.О. КОНДРАЦКИЙ

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИКОПОДОБНЫХ ДИОКСИД ЦИРКОНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ С ДОБАВЛЕНИЕМ СУБМИКРОННОГО ПОРОШКА ОКСИДА ИТТРИЯ

Керамикоподобные покрытия формировали методом микродугового оксидирования (МДО) на циркониевом сплаве Э110 (1% Nb) с добавлением в электролит-сuspension субмикронного порошка оксида иттрия. Полученные покрытия исследовали с помощью методов растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Показано, что добавки субмикронного порошка оксида иттрия в электролит способствуют стабилизации тетрагональной фазы в МДО-покрытии.

G.V. PANASOVA, S.V. SAVUSHKINA, A.M. BORISOV,
A.A. ASHMARIN, I.O. KONDRATSKY

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

STUDY OF CERAMIC-LIKE ZIRCONIUM DIOXIDE COATINGS FORMED BY MICROARC OXIDATION WITH ADDITION OF SUBMICRON YTTRIA POWDER

Ceramic-like coatings were formed on zirconium alloy E110 (1% Nb) by microarc oxidation (MAO) with the addition of submicron yttria powder. Formed coatings was investigated using the methods of scanning electron microscopy and XRD analysis. It was shown that the addition of submicron yttria powder in the electrolyte contributes to the stabilization of the tetragonal phase in the MAO coating.

Микродуговое оксидирование (МДО) является перспективным методом получения керамикоподобных покрытий из диоксида циркония [1-2]. Исследования МДО циркониевых сплавов проводят для получения биосовместимых покрытий имплантов, для защиты от коррозии ТВЭЛов, для получения теплозащитных покрытий. Стабилизация тетрагональной фазы в МДО-покрытии позволяет улучшить его функциональные свойства. МДО в электролите-сuspension с добавками нанопорошка оксида иттрия позволяет получать диоксид циркониевые покрытия тетрагональной мо-

дификации [3-4]. Однако нанопрошки имеют высокую стоимость, быстро агломерируются и, соответственно, требуют дополнительных операций и оборудования для подготовки электролита-суспензии.

Перспективной заменой нанопорошков могут служить порошки субмикронного размера. В настоящей работе исследована структура керамикопоподобных диоксид циркониевых покрытий, формируемых микродуговым оксидированием с добавлением в электролит субмикронного порошка оксида иттрия. Покрытия получали на образцах сплава Э110 (Zr-99%, Nb-1%) в электролите-суспензии, содержащем 5 г/л гипофосфита натрия и 9 г/л жидкого стекла с добавкой 6 г/л субмикронного порошка оксида иттрия. МДО проводили в анодно-катодном режиме с соотношением токов 1:1 в течение 60 минут с суммарной плотностью тока 20 и 30 А/дм². Морфологию поверхностного слоя покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 600. Рентгенофазовый анализ проводили в медном $K_{\alpha 1,2}$ излучении на рентгеновском θ - θ дифрактометре EMPYREAN (PANalytical). Фазы идентифицировали по базе данных ICDDPDF-2.

Толщины МДО-покрытий составили 40 и 110 мкм для покрытий, полученных при плотностях тока 20 и 30 А/дм². Покрытия характеризуются типичной для диоксид циркониевых МДО-покрытий структурой из двух типов областей: кратерной и глобулярной. В покрытии, полученном при большей плотности тока, наблюдается большая площадь областей с преобладанием компонентов из электролита. Рентгенофазовый анализ показал, что с увеличением плотности тока от 20 до 30 А/дм² возрастает соотношение содержания фаз диоксида циркония тетрагональной к моноклинной от 0,66 до 1.

Таким образом, добавка субмикронного порошка оксида иттрия приводит к подавлению моноклинной фазы диоксида циркония. Эффект подавления возрастает с увеличением плотности тока при МДО.

Список литературы

- [1] Apelfeld A.V., Borisov A.M., Krit B.L., Ludin V.B., Polyansky M.N., Romanovsky E.A., Savushkina S.V. et al. // Surf. Coat. Technol. 2015. Vol. 269, PP. 279–285.
- [2] Savushkina S.V., Polyansky M.N., Borisov A.M., Vinogradov A.V., Lydin V.B., Dankova T.E., Agureev L.E. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2016. Vol. 10, PP. 406–411.
- [3] Apelfeld A.V., Ashmarin A.A., Borisov A.M., Vinogradov A.V., Savushkina S.V., Shmytkova E.A. // Surf. Coat. Technol. 2017. Vol. 328, PP. 513–517.
- [4] Savushkina S.V., Ashmarin A.A., Apelfeld A.V., Borisov A.M., Vinogradov A.V., Polyansky M.N., Bogdashkina N.L. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 857, P. 012037.

С.В. ПОКРОВСКИЙ, А.А. БУРА, И.В. АНИЩЕНКО, Д.А. АБИН,
М.А. ОСИПОВ, И.А. РУДНЕВ

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВТСП ЛЕНТАХ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ

Данная работа посвящена исследованию динамических процессов перехода ВТСП лент второго поколения в нормальное состояние под действием импульсных токовых нагрузок. Показана возможность устойчивого восстановления сверхпроводящего состояния в режиме одиночного импульса и возникновения колебаний тока при дополнительном протекании стационарного тока ниже критического.

S.V. POKROVSKII, A.A. BURA, I.V. ANISCHENKO, D.A. ABIN,
M.A. OSIPOV, I.A. RUDNEV

National Research Nuclear University "MEPHI", Moscow

INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES IN SECOND GENERATION HTS TAPES AT PULSE CURRENT LOADS

Важным аспектом работы многих устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников является переход из сверхпроводящего в нормальное состояние. При этом локальное выделение тепла усугубляется малой скоростью распространения горячего пятна, что приводит к повреждению ВТСП ленты. С другой стороны, контролируемый безопасный переход сверхпроводника между состояниями является необходимым свойством для переключателей и ключей.

В данной работе рассмотрены нестационарные процессы нагрева ВТСП ленты второго поколения при токовых нагрузках вплоть до амплитуд выше критического тока (77К, собственное поле). Воздействие проводилось как одиночными импульсами тока, так и совместно с постоянным транспортным током ниже критического значения (смешанный режим).

В качестве образцов были использованы сверхпроводящие ленты медным защитным покрытием. Были измерены ВАХ образцов при воздействии импульсов тока при охлаждении в жидком азоте. Получены критические параметры (амплитуда, время нарастания транспортного тока) токовых импульсов, приводящие к деградации сверхпроводника. Было обнаружено, что вследствие гистерезиса кривой кипения жидкого азота в сверхпроводнике наблюдается возвратный процесс восстановления

сверхпроводящего состояния при импульсной токовой нагрузке, а также возникновение колебаний тока в смешанном режиме.

С помощью холловской магнитометрии исследованы локальные токонесущие характеристики ВТСП лент. Выявлены особенности влияния локальных неоднородностей распределения критического тока лент на процессы перехода сверхпроводника в нормальное состояние. Представлена модель сверхпроводящей ленты. В модели используются транспортные характеристики промышленных ВСП лент второго поколения, а также тепловые свойства слоев ленты. Моделирование выполнялось с помощью метода конечных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-10024).

В.В. ПОПОВ¹, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, Б.Р. ГАЙНАНОВ¹,
А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹, А.А. ИВАНОВ¹, Ф. Д'АКАПИТО², А. ПУРИ²,
Г.Р. КАСТРО², И.В. ЩЕТИНИН³, М.В. ЖЕЛЕЗНЫЙ³,
Н.А. ЦАРЕНКО⁴, Л.А. АРЖАТКИНА⁴, К.В. ПОКРАТОВ⁵

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Европейский центр синхротронного излучения, Гренобль, Франция

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

⁴АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии»

⁵ООО Ренишоу, Москва

ОБРАТИМЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД «ПОРЯДОК– БЕСПОРЯДОК–ПОРЯДОК» В СЛОЖНЫХ ОКСИДАХ (Yb_xPr_{1-x})₂(Ti_yZr_{1-y})₂O₇ (0 < x < 1, 0 < y < 1)

Впервые с помощью комплекса методов рентгеновской дифракции, XAFS спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния исследованы особенности образования и эволюции кристаллической и локальной структуры сложных оксидов (Yb_xPr_{1-x})₂(Ti_yZr_{1-y})₂O₇ (0 < x < 1, 0 < y < 1) при полностью обратимом фазовом переходе «порядок-беспорядок-порядок». Установлены новые эффективные индикаторы наличия и границы существования пирохлорной фазы.

V.V. POPOV¹, A.P. MENUSHENKOV¹, B.R. GAYNANOV¹,
A.A. YASTREBTSEV¹, A.A. IVANOV¹, F. D'ACAPITO², A. PURI²,
G.R. CASTRO², I.V. SHCHETININ³, M.V. ZHELEZNYI³,
N.A. TSARENKO⁴, L.A. ARZHATKINA⁴, K.V. PONKRATOV⁴

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

²European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow

⁴JSC Scientific Research Institute of Chemical Technology, Moscow

⁵Renishaw plc, Moscow

FULLY REVERSIBLE PHASE TRANSITION “ORDER- DISORDER-ORDER” IN COMPLEX OXIDES (Yb_xPr_{1-x})₂(Ti_yZr_{1-y})₂O₇ (0 < x < 1, 0 < y < 1)

We have carried out combined study of formation and evolution of the crystal and local structure of complex oxides (Yb_xPr_{1-x})₂(Ti_yZr_{1-y})₂O₇ (0 < x < 1, 0 < y < 1) upon completely reversible “order-disorder-order” phase transition using XRD, XAFS and Raman spectroscopy. New sensitive indicators of the presence and boundaries of the existence of the pyrochlore phase have been found.

Сложные оксиды редкоземельных элементов (РЗЭ) с общей формулой $A_2^{(3+)}B_2^{(4+)}O_7$ ($A = \text{РЗЭ}$; $B = \text{Ti, Zr, Hf}$) являются уникальными системами для исследования фазовых переходов «порядок-беспорядок» и имеют важные потенциальные практические применения. Одним из основных факторов, определяющих кристаллическую и локальную структуру этих соединений, является отношение радиусов катионов $\gamma = r_{A(3+)}/r_{B(4+)}$ [1, 2].

В работе представлены результаты совместного анализа данных XRD, XAFS спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) по локальной перестройке атомной структуры в ходе кристаллизации и полностью обратимого фазового перехода «порядок-беспорядок-порядок» в соединениях $(\text{Yb}_x\text{Pr}_{1-x})_2(\text{Ti}_y\text{Zr}_{1-y})_2\text{O}_7$ ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$), синтезированных из жидкой фазы соосаждением и золь-гель методом с последующим прокаливанием аморфных прекурсоров. Показано, что последовательная замена f - и d -элементов в соответствии со схемой: $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 \rightarrow (\text{Pr}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ($0 < x < 1$) $\rightarrow \text{Yb}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{Yb}_2(\text{Zr}_{1-y}\text{Ti}_y)_2\text{O}_7$ ($0 < y < 1$) $\rightarrow \text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7 \rightarrow (\text{Yb}_{1-x}\text{Pr}_x)_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($0 < x < 1$) $\rightarrow \text{Pr}_2\text{Ti}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{Pr}_2(\text{Ti}_{1-y}\text{Zr}_y)_2\text{O}_7$ ($0 < y < 1$) $\rightarrow \text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ приводит к реализации полностью обратимого фазового перехода «пирохлор – флюорит (δ -фаза) - пирохлор – слоистая перовскитоподобная структура - пирохлор» в цирконатах и титанатах РЗЭ.

Исследование локальной структуры показало, что XANES-спектры K -края поглощения Ti являются (наряду с XRD) эффективным индикатором кристаллизации аморфных прекурсоров. В то же время XANES- и EXAFS-спектры L_3 -края поглощения РЗЭ содержат особенности, которые могут служить хорошим индикатором образования фазы пирохлора. Было обнаружено, что результаты спектроскопии КР, дающей информацию об анионном упорядочении локальной структуры исследованных соединений, хорошо коррелируют с результатами XRD и XAFS спектроскопии.

Проведенный комплексный анализ показал, что в изученных соединениях $(\text{Yb}_x\text{Pr}_{1-x})_2(\text{Ti}_y\text{Zr}_{1-y})_2\text{O}_7$ ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$) граница между совершенным пирохлором и дефектным флюоритом близка к $\gamma \sim 1.46$ -1.51. Граница между идеальным пирохлором и началом формирования слоистой перовскитоподобной структуры близка к $\gamma \sim 1.65$ -1.70.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-12-00133).

Список литературы

- [1] Popov V.V., Menushenkov A.P., Yaroslavtsev A.A. et al. // J. Alloys Compd. 2016. Vol. 689, PP. 669-679.
- [2] Popov V.V., Menushenkov A.P., Gaynanov B.R. et al. // J. Alloys Compd. 2018. Vol. 746. PP. 377-390.

В.В. ПОПОВ^{1,2}, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, А.Ю. МОЛОКОВА¹,
М.М. БЕРДНИКОВА¹, А.А. ПИСАРЕВ¹, В.А. ГРИГОРЬЕВ¹,
Е.В. ХРАМОВ², И.В. ЩЕТИНИН³, М.В. ЖЕЛЕЗНЫЙ³,
Н.А. ЦАРЕНКО⁴, Н.В. ОГНЕВСКАЯ⁴, К.В. ПОКРАТОВ⁵

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

⁴АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии»

⁵ООО Ренишоу, Москва

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И ЛОКАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ ПОРОШКОВ MoO_3

Методами рентгеновской дифракции, рентгеновской спектроскопии поглощения (EXAFS и XANES), ИК- и спектроскопии комбинационного рассеяния, сканирующей электронной микроскопии изучено влияние условий синтеза на кристаллическую и локальную структуру порошков MoO_3 , полученных путем термического разложения гептамолибдата аммония, а также осаждения водных растворов молибдатов в сильноокислой среде.

V.V. POPOV^{1,2}, A.P. MENUSHENKOV¹, A.Yu. MOLOKOVA¹,
M.M. BERDNIKOVA¹, A.A. PISAREV¹, V.A. GRIGOREV¹,
E.V. KHRAMOV², I.V. SHCHETININ³, M.V. ZHELEZNYI³,
N.A. TSARENKO⁴, N.V. OGNEVSKAYA⁴, K.V. PONKRATOV⁵

¹National Research Nuclear University MPhI

²National Research Center "Kurchatov Institute"

³National University of Science and Technology MISiS

⁴JSC Scientific Research Institute of Chemical Technology, Moscow

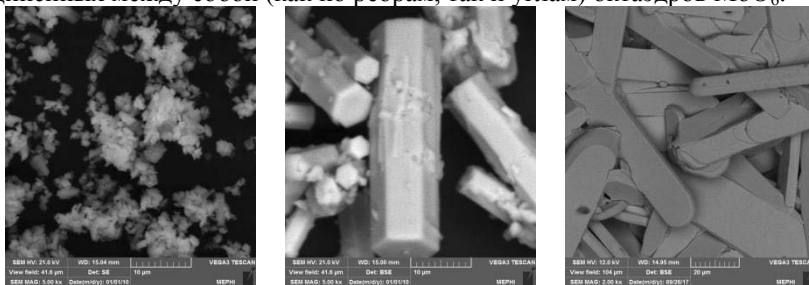
⁵Renishaw plc., Moscow

THE INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE CRYSTAL AND LOCAL STRUCTURE MoO_3 POWDERS

A combination of X-ray powder diffraction, EXAFS and XANES-spectroscopy, Raman and IR-spectroscopy, and scanning electron microscopy was used for investigation of the influence of synthesis conditions on crystal and local structure of MoO_3 powders prepared by thermal decomposition of ammonium heptamolybdate and precipitation of molybdates aqueous solutions in strong acid conditions.

В настоящее время MoO_3 широко используется в качестве катодов в литий ионных батареях, селективного катализатора окисления углеводов и спиртов, материала для газовых сенсоров и дисплеев и т.д. [1, 2]. Целью данной работы являлось изучение влияния вида (типа) синтеза и его параметров на кристаллическую и локальную структуру порошков MoO_3 с помощью широкого комплекса физико-химических методов.

Установлено, что в результате осаждения растворов гептамолибата аммония (ГМА) в сильноокислой среде ($\text{pH} = 1.0$) при комнатной температуре происходит образование слабо закристаллизованных соединений переменного состава $\text{MoO}_3 \cdot m\text{NH}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (рис. 1а). Увеличение температуры до 90°C приводит к образованию хорошо закристаллизованных частиц (ОКР > 100 нм) с гексагональной кристаллической структурой $\text{NH}_3(\text{MoO}_3)_3$ (JCPDS № 78-1027) (рис. 1б). Нейтрализация раствора молибата натрия при 90°C приводит к образованию частиц h-MoO_3 , имеющих гексагональную кристаллическую структуру (JCPDS № 21-0569). Термообработка как прекурсоров, так и ГМА при температурах $\geq 350^\circ\text{C}/2$ ч приводит к образованию однофазных порошков $\alpha\text{-MoO}_3$ с орторомбической структурой (JCPDS № 05-0508). Были получены таблетки MoO_3 с относительной плотностью 70-74% (рис. 1в). Локальная структура как гидратированных оксидов молибдена, синтезированных из жидкой фазы, так и оксидов молибдена, полученных пиролизом ГМА, представляет собой различные комбинации соединений между собой (как по ребрам, так и углам) октаэдров MoO_6 .



СЭМ микрофотографии частиц прекурсоров, полученных осаждением ГМА при 20°C (а) и 90°C (б), а также поверхности таблеток MoO_3 (в)

Работа выполнена по гранту Министерства образования и науки Российской Федерации 3.9750.2017/БЧ.

Список литературы

- [1] Wienold J., Jentoft R.E., Ressler T. // Eur. J. Inorg. Chem. 2003. Vol. 2003(6). PP. 1058-1071.
- [2] Lunk H.-J., Hartl H., Hartl M.A. et al. // Inorg. Chem. 2010. Vol. 49. PP. 9400-9408.

А.Р. ПРИЩЕПА^{1,2}, А.В. САДАКОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО СВЕРХПРОВОДНИКА ВКФА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПО МЕТОДУ АС-КАЛОРИМЕТРИИ

Была измерена теплоёмкость монокристалла железосодержащего сверхпроводника ВКФА ($\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ с $x=0,33$). Измерения проводились по методу АС-калориметрии в магнитных полях величиной 0-16 Т параллельных оси c кристалла. В результате обработки данных была получена зависимость $H_{c2}(T)$.

A.R. PRISHCHERA^{1,2}, A.V. SADAKOV²

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

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

THERMODYNAMIC MEASUREMENTS OF THE IRON-BASED SUPERCONDUCTOR BKFA IN A MAGNETIC FIELD BY USING AC-CALORIMETRY METHOD

The single crystal specific heat of iron-based superconductor BKFA ($\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ with $x = 0.33$) was measured. The measurements were carried out by the method of AC-calorimetry in magnetic fields 0-16T applied along the c -axis of the crystal. As a result of data analyzing, the temperature dependence of upper critical field $H_{c2}(T)$ was obtained.

Сверхпроводники на основе железа обладают хорошим потенциалом для практического применения. Средняя критическая температура по классу данных сверхпроводников составляет 100 К (в монослое FeSe), а значение второго критического поля $H_{c2}=200$ Тл. Помимо этого железосодержащие сверхпроводники относятся к классу многозонных, которые имеют как минимум две сверхпроводящие щели. Для теоретического описания подобных материалов потребуется привлечение двухщелевой альфа-модели [1],[2], поскольку оно находится за пределами теории БКШ.

В настоящей работе исследовались монокристаллы ВКФА ($\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ с $x=0.33$), который был выращен в хим. лаборатории отде-

ления ЦВСиКМ [3]. Хорошее качество образца было подтверждено измерениями намагниченности.

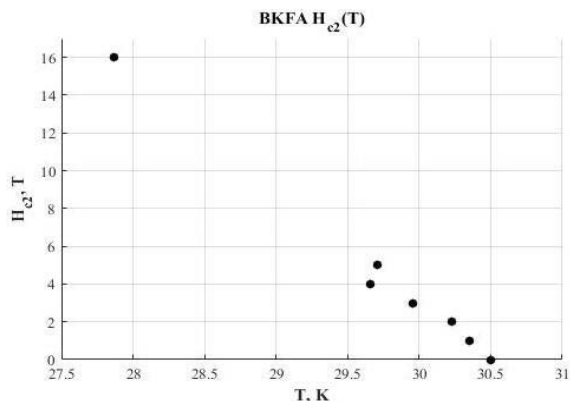


Рис. 1. Второе критическое поле ВКФА в зависимости от температуры.

Измерения теплоёмкости проводились методом АС-калориметрии [4] в установке Cryogen Free Measurement System (CFMS) фирмы Cryogenic при температурах 4-60К и магнитных полях 0-16Т, приложенных вдоль оси с кристалла. Встроенный в CFMS калориметр представляет собой тонкую мембрану с напылёнными на неё нагревателем и термометром.

В основе АС метода лежит нагревание образца переменным током, текущим через нагреватель. Переменный ток порождает температурные модуляции на образце, которые улавливает резистивный термометр. Если знать тепловую мощности ΔQ , которая выделяется за единицу времени на нагревателе, и изменение температуры образца ΔT , то можно получить теплоёмкость $C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$. Преимуществом АС-калориметрии над традиционным релаксационным методом является возможность более тщательного съёма данных при одних и тех же временных затратах.

В результате измерений была установлена критическая температура сверхпроводящего перехода $T_c \approx 30,5\text{К}$. С помощью полевых данных теплоёмкости была получена зависимость второго критического поля в зависимости от температуры, которая изображена на рис. 1.

Список литературы

- [1] Padamsee H., Neighbor J.E., Shifman C.A. et al. // Temp. Phys. 1973. Vol. 12. P. 387.
- [2] Bouquet F., Wang Y., Fisher R.A. et al. // Europhys. Lett. 2001. Vol. 56. № 6.
- [3] Kuzmicheva T.E., Pudalov V.M. et al. // Phys. Usp. 2017. Vol. 60. PP. 419–429.
- [4] Ventura, Thermal Properties of Solids at Room and Cryogenic Temperatures. 2014. PP. 55-57

Р.Ш. РАМАКОТИ¹, О.Б. АНАНЬИН¹, А.П. МЕЛЕХОВ¹,
И.А. ГЕРАСИМОВ¹, Г.С. БОГДАНОВ¹, В.Г. СРЕДИН²,
И.К. НОВИКОВ¹, Д.С. ДОМАНИН¹, И.В. ФРОЛОВА¹

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет (МИФИ), Москва

²Военная академия РВСН им. Петра Великого

НЕТЕПЛОВОЙ МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ CdHgTe ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведено сравнении результатов воздействия теплового и мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на полупроводник CdHgTe. Дано качественное описание процесса нетеплового механизма дефектообразования при воздействии МРИ на данный полупроводник.

R.S. RAMAKOTI¹, O.B. ANANIN¹, A.P. MELEKHOV¹,
I.A. GERASIMOV¹, G.S. BOGDANOV¹, V.G. SREDIN²,
I.K. NOVIKOV¹, D.S. DOMANIN¹, I.V. FROLOVA¹

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

²Military Academy of the RVSN

NON-THERMAL MECHANISM OF DEFECTION FORMATION IN THE SEMI-CONDUCTOR CdHgTe UNDER THE ACTION OF SOFT X-RAY RADIATION

A comparison of the effects of thermal and soft X-ray radiation on the CdHgTe semiconductor was made. A qualitative description of the process of the nonthermal mechanism of defect formation when soft X-ray is applied to this semiconductor is given.

В работе показано, что тепловое воздействие от сфокусированного импульсного лазерного излучения не приводит к значительным изменениям в кристаллической структуре приповерхностного слоя. В качестве источника теплового излучения использовался твердотельный лазер на Nd с длиной волны 1.06 мкм, работающий в режиме *свободной* генерации. Мощность лазерного излучения составляла $P=7.5$ Вт ($E_{laser}=1.5$ мДж и $\tau \leq 200$ мкс), доза – $D_{laser} \leq 10$ Дж/см². Для сравнения доза МРИ в тепловом эквиваленте $D_{mri} \leq 0.2$ Дж/см² в десяти импульсах с $E_{mri}=0.7$ мДж и $\tau_{mri} \leq 20$ нс. До и после облучения, образец CdHgTe устанавливался в камеру с масс-анализатором заряженных частиц. С помощью сфокусированного излучения того же лазера, работающего в режиме *модуляции добротности*

сти, на поверхности образца создавалась плазма, ионный состав которой анализировался на анализаторе. Результаты приведены на рисунке 1.

Аналогичный эксперимент по изучению влияния интенсивного ионизирующего излучения на элементный состав в приповерхностных слоях вещества был проведён до и после облучения образца CdHgTe импульсным МРИ. Источником МРИ в данной работе является лазерная плазма, полученная за счет фокусирования лазерного излучения на медную мишень. Для увеличения интенсивности МРИ используется рентгеновский концентратор, который позволяет получить мощность МРИ до 10^5 Вт/см². Доза облучения МРИ в тепловом эквиваленте $D_{mri} \leq 0.2$ Дж/см² в десяти импульсах с $E_{mri} = 0.7$ мДж и $\tau_{mri} \leq 20$ нс. Результаты приведены на рисунке 2. Концентрация ионов Hg изменилась после облучения (область 2 на рис.2), что свидетельствует о миграции ионов в приповерхностном слое из узлов кристаллической решетки. Вероятнее всего, в местах прежнего нахождения иона Hg образуется вакансии, а в новых – междоузлия. Большая часть МРИ при облучении образца переходит в тепловую энергию, но, как показал первый эксперимент, тепловое воздействие не приводит к изменениям в образце. Следовательно, механизм дефектообразования носит нетепловой характер и, по всей видимости, связан с поглощением МРИ электронами атомов и вторичными процессами.

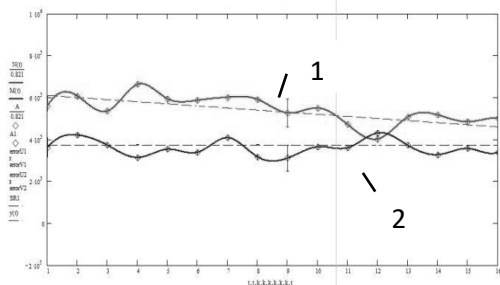


Рисунок 1 – Сравнение результатов до и после воздействия теплового излучения на полупроводник CdHgTe. Линия 1 – концентрация ионов Hg до теплового облучения, линия 2 – после.

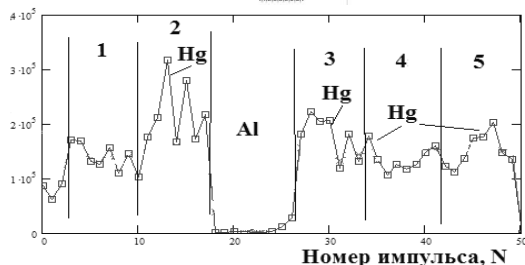


Рисунок 2 – Сравнение результатов до и после воздействия МРИ на полупроводник CdHgTe. Область 2 облучена МРИ. Области 3-5 облучены не облучены. Область между ними – часть образца, закрытая толстой алюминиевой фольгой.

Список литературы

- [1] Ананьин О.Б. и др. // Известия высших учебных заведений. 2013. Т. 56. № 9/2. С. 40-43.

А.А. РЕЗВАН, В.С. КЛИМИН, Р.В. ТОМИНОВ,
М.С. СОЛОДОВНИК, О.А. АГЕЕВ

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ, Таганрог,
Россия*

БЕЗМАСОЧНОЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ GaAs МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Была предложена идея, заключающаяся в комбинации методов локального анодного окисления и плазмохимического травления для решения задачи профилирования и модификации данных структур. Продемонстрировано влияние режимов данных методов, а именно напряжения формирования и времени травления, на шероховатость и геометрические параметры, а также построены соответствующие зависимости. Для анализа поверхности использовались зондовые нанотехнологии.

A.A. REZVAN, V.S. KLIMIN, R.V. TOMINOV,
M.S. SOLODOVNIK, O.A. AGEEV

*Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation SFedU
(Southern Federal University), Taganrog, Russia*

RESISTLESS FORMATION OF NANOSIZED RELIEF ON THE SURFACE GaAs BY THE METHOD OF PLASMA CHEMICAL ETCHING

An idea, consisting in a combination of methods of local anodic oxidation and plasma chemical etching to solve the problem of profiling and modifying these structures, was proposed. The influence of the modes of these methods, namely, the formation voltage and the etching time, on the roughness and geometrical parameters, and the corresponding dependences are shown. Probe nanotechnologies were used for surface analysis.

Сочетание локального анодного окисления с последующим химическим травлением в низкотемпературной плазме является перспективной технологией формирования сложного рельефа поверхностей наноразмерных структур, их модификации и профилирования. Основной особенностью данного метода является возможность высокоточной вариации наноразмерной обработки [1-2]. Кроме того, дополнительные операции по очистке поверхности от продуктов остаточных реакции и различных примесей от исходных реагентов не требуются для данной технологии. В на-

стоящей работе проведено экспериментальное исследование параметров процессов модифицирования и обработки поверхности арсенид-галлиевых структур GaAs комбинацией методов локального анодного окисления и плазмохимического травления. Материалом подложки выступали пластины собственного арсенида галлия, геометрические параметры поверхности которых были улучшены после стандартной жидкостной полировки [3-4]. Далее поверхность подложек была подвержена модификацией методом локального анодного окисления и благодаря чему образован слой оксидных наноструктур. Данные оксидные наноразмерные структуры были получены при следующих параметрах формирования: относительная влажность – 90%, скорость передвижения зонда - 2,5 мкм/сек, ток цепи обратной связи микроскопа – 1 нА, а напряжение формирования варьировалось от 6 до 10 В. Сформированные слои окисла играли роль негативных масок при последующем плазмохимическом травлении на установке STE ICPe68. В качестве хлорсодержащего газа был выбран BCl_3 , отличающийся от аналогов некоторыми параметрами влияния на протекание процесса травления в низкотемпературной плазме наноструктур на основе арсенида галлия. Смесь газов реакционной камеры состояла из буферного газа $\text{N}_{\text{Ar}} = 100 \text{ см}^3/\text{мин}$ и хлорсодержащего газа $\text{N}_{\text{BCl}_3} = 15 \text{ см}^3/\text{мин}$. Время травления t эксперимента варьировалась варьировалось в диапазоне от 0,5 до 2 минут. Контроль топологии поверхности осуществлялся на каждом этапе исследования при помощи метода атомно силовой микроскопии зондовой нанолaborаторией NTegra [5]. В исследовательской работе был произведен анализ влияния параметров формирования, таких как время воздействия хлористой плазмой и напряжение формирования, геометрические параметры объемных структур на основе GaAs. Данные параметры варьировались, так время изменялось от 0,5 до 2 минут, а напряжение формирования от 6 до 10 В. Экспериментальные данные показали, что благодаря данной технологии возможно подобрать параметры процесса обработки, которые позволят с высокой точностью получать наноразмерный профиль.

Данная работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант No. 15-19-10006. Исследование проведено в Научно-образовательном центре «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

- [1] Климин В.С. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 4 (189), С. 169-178.
- [2] Klimin V.S., Rezvan A. A. and Ageev O. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1124, P. 022035.
- [3] Klimin V.S., Rezvan A. A., Kots I. N. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1124, P. 071019.
- [4] Klimin V.S., Rezvan A. A. and Ageev O. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1124, P. 071020.

Д.А. РОДИОНОВ, И.В. ЗАГОРОДНЕВ

*Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН,
Москва, Россия*

ПОГЛОЩАЮТ ЛИ МАГНИТОПЛАЗМОНЫ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ДВУМЕРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ?

Проанализирован коэффициент поглощения электромагнитных волн в двумерном электронном газе в постоянном магнитном поле с проводимостью в модели Друде. Установлена связь максимума в зависимости коэффициента поглощения от угла падения с собственными модами магнитоплазменных колебаний.

D.A. RODIONOV, I.V. ZAGORODNEV

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

WHETHER DO PLASMONS ABSORB ELECTROMAGNETIC RADIATION IN INFINITE TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS?

The coefficient of absorption was analyzed for electromagnetic waves in two-dimensional electron gas in constant magnetic perpendicular field with conductivity from Drude's model. The connection between the maximum in dependent the coefficient of absorption on incident angle and eigenmodes of magnetoplasmon oscillations was found.

В работе [1] проанализирован закон дисперсии плазмонполяритонов в постоянном магнитном поле, ортогональном плоскости 2D электронной системы (2D EC). Оказалось, что он существенно зависит от параметров системы, а при определенных параметрах системы (в фазах S1 и S2) возникает новая высокодобротная мода, расположенная выше световой ветви. Однако вопрос о том, как эта мода может быть возбуждена осталась открытым. В данном докладе мы ответим на этот вопрос [2].

Для этого мы вычислили оптические коэффициенты (поглощения, прохождения и отражения) и установили, что полюса оптических коэффициентов не связаны с магнитоплазмонами. Ноль знаменателя любого оптического коэффициента совпал бы с дисперсионным соотношением, описывающим плазменные колебания из [1], если бы $\cos\theta$, где θ - угол падения ЭМ волны, отсчитанный от нормали к 2D EC, был бы равен $i\beta c/\omega$, где $\beta = \sqrt{q^2 - \omega^2/c^2}$, а q - волновой вектор плазмона $q =$

$\omega \sin \theta / c$ (из закона сохранения импульса вдоль плоскости 2DЭГ). Для анализа собственных мод 2DEG ветвь корня, определяющая β , выбирается с условием $\text{Re}(\beta) \geq 0$. Это приводит к условию $\text{Im}(\beta) \geq 0$, следовательно, выражение не может определять косинус (реального) угла падения.

Парадокс состоит в том, что при этом в зависимости коэффициента поглощения от угла падения может быть максимум, который и не определяется полюсами, но связан с увеличением поглощения за счет возбуждения магнитоплазмонов. Для удобства сравнения с результатами работы [1] на рис. 1 и рис. 2 приведены контурные графики коэффициента поглощения в зависимости от частоты и проекции волнового вектора ЭМ волны на плоскость 2DЭГ. На приведенных рисунках видно соответствие между законом дисперсии магнитоплазмона из [1] с максимумом коэффициента поглощения s-поляризованной ЭМ волны (в фазах S1 и S2).

Таким образом, мы показали, что предсказанные в работе [1] новые высокодобротные магнитоплазмоны, идущие выше дисперсии света, проявляются в коэффициенте поглощения плоской ЭМ волны даже в системе с низкой проводимостью, когда $\frac{2\pi\sigma_0}{c} < 1$ (в фазах S1 и S2). При этом все оптические коэффициенты (отражения, прохождения и поглощения) вне циклотронного резонанса монотонно зависят от частоты. Коэффициенты прохождения и отражения, к тому же, монотонно зависят от угла падения. Коэффициент прохождения для s-поляризации хотя и не имеет полюсов в окрестности предсказанных магнитоплазменных мод, имеет максимум в зависимости от угла падения ЭМ волны, возникающий из-за возбуждения магнитоплазмонов [2].

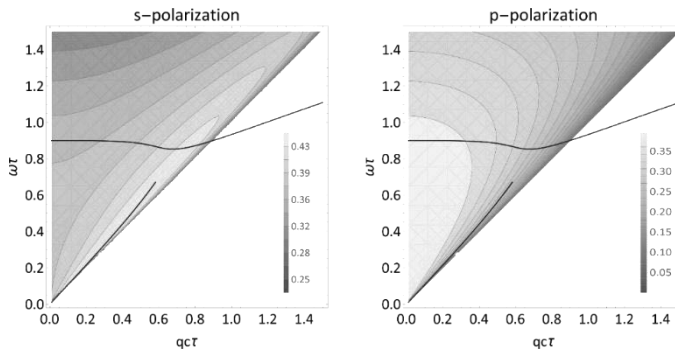


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от проекции волнового вектора q , умноженного на скорость света c и время релаксации τ , падающей ЭМ волны и её частоты $\omega\tau$ при циклотронной частоте $\omega_c\tau = 0,9$ и обезразмеренной на скорость света статической проводимости $\alpha = \frac{2\pi\sigma_0}{c} = 0,8$. Сплошные (синие) линии – спектр плазмона из [1] (в S1-фазе).

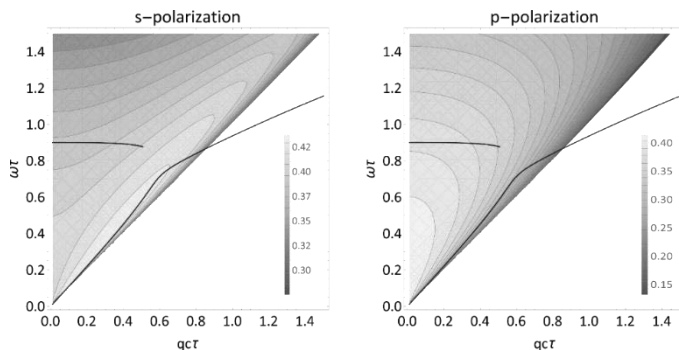


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения от проекции волнового вектора q , умноженного на скорость света c и время релаксации τ , падающей ЭМ волны и её частоты $\omega\tau$ при циклотронной частоте $\omega_c\tau = 0,9$ и обезразмеренной на скорость света статической проводимости $\alpha = \frac{2\pi\sigma_0}{c} = 0,98$. Сплошные (синие) линии – спектр плазмона из [1] (в S2-фазе).

Список литературы

- [1] Volkov V.A., Zabolotnykh A.A., Undamped relativistic magnetoplasmons in lossy two-dimensional electron systems // Phys. Rev. B. 2016. Vol. 94. P.165408.
- [2] Родионов Д.А., Загороднев И.В., Поглощение электромагнитных волн плазменными колебаниями в неограниченном двумерном электронном газе в магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. Т. 109. вып. 2. С.124–128.

Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, И.С. ВАСИЛЬЕВСКИЙ,
Д.А.САФОНОВ, А.А. СОЛОВЬЕВ, А.А. ИВАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия*

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ В- НАСЫЩЕННОЙ ФАЗЫ $t\text{-BC}_3$ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ

Исследовано структурное превращение в тонких пленках BC_3 , полученных методом импульсного лазерного осаждения на сапфире и подвергшихся воздействию наносекундных лазерных импульсов. Установлено, что независимо от исходного структурного состояния пленок после облучения формировалась фаза $t\text{-BC}_3$ без признаков сегрегации бора и преципитации карбида бора. Синтезированная пленка $t\text{-BC}_3$ проявляла высокую электропроводность, которая имела температурную зависимость полупроводникового типа в интервале температур от 4,5 до 300 К.

R.I. ROMANOV, V.Y. FOMINSKI, I.S. VASILIEVSKI,
D.A.SAFONOV, A.A. SOLOVIEV, A.A. IVANOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

FORMATION OF BORONATED CARBON $t\text{-BC}_3$ PHASE UNDER PULSED LASER MELTING

The structural transformation in BC_3 thin films obtained by pulsed laser deposition on sapphire and exposed to nanosecond laser pulses was studied. It was found that, irrespective of the initial structural state of the films, after irradiation, the $t\text{-BC}_3$ phase was formed without signs of boron segregation and precipitation of boron carbide. The synthesized $t\text{-BC}_3$ film had a high electrical conductivity with a semiconductor-type temperature dependence in the temperature range from 4.5 to 300 K.

Бор-углеродные пленки (BC_x) привлекают внимание благодаря высокой термической и химической стабильности, хорошей электропроводности и пр. Согласно теоретическим расчетам сверхтвердая фаза $c\text{-BC}_3$ с кубической кристаллической решеткой может обладать высокотемпературной сверхпроводимостью [1]. Однако, получение этой фазы затруднено необходимостью создания экстремально высоких температуры и давления.

В работе были проведены эксперименты по формированию методом импульсного лазерного осаждения и последующему лазерному отжигу (ЛО) пленок BC_3 . Напыление проводилось из двух монослойных или одной композитной мишени, полученной прессованием порошков углеродной сажи и аморфного В на сапфировую подложку. При ЛО использовался эксимерный KrF лазер. Плотность энергии лазерного излучения составляла $\sim 1 \text{ Дж/см}^2$. Согласно спектрам комбинационного рассеяния (КР), приведенным на рис. 1а, изначально аморфная структура пленок ($\alpha\text{-BC}_3$) в результате ЛО преобразовалась в графитоподобную турбостратную ($t\text{-BC}_3$). На это указывают положения пиков D (1337 см^{-1}) и G (1575 см^{-1}) и отсутствие пиков, соответствующих бору и карбиду бора. Фаза $t\text{-BC}_3$ обладает структурой, состоящей из графитовых слоев, в которых часть атомов углерода заменена атомами бора, разупорядоченных в направлении базовой плоскости [2].

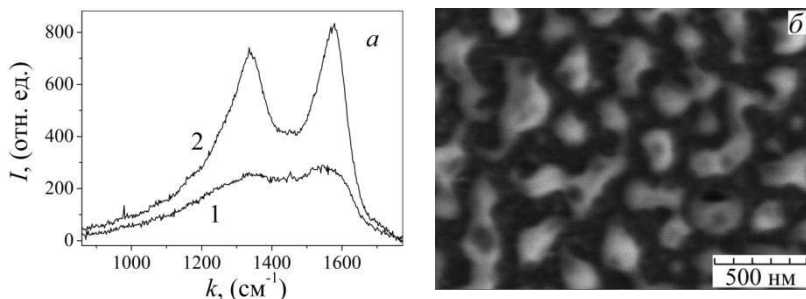


Рис. 1. (а) - Спектры КР пленки BC_3 до (1) и после (2) ЛО, (б) - изображение поверхности пленки BC_3 после ЛО.

На изображении, полученном сканирующей электронной микроскопией (рис. 1б), видно, что ЛО вызывало плавление пленки и образование неоднородностей размером до 300 нм. Удельное сопротивление пленок при комнатной температуре после ЛО уменьшилось с 2,8 до 1,2 Ом·см. При понижении температуры до 4,5 К удельное сопротивление пленок $\alpha\text{-BC}_3$ и $t\text{-BC}_3$ увеличилось до 3,6 и 1,4 Ом·см, соответственно.

Список литературы

- [1] Liu H., Li Q., Zhu L., Ma Y.// *Physics Letters A*. 2011. Vol. 375, P. 771–774.
- [2] Kurakevych O.O., Solozhenko E.G., Solozhenko V.L.// *High Pressure Research*. 2009. Vol. 29, № 4, P. 605–611.

П.С. САВЧЕНКОВ, П.А. АЛЕКСЕЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ВАЛЕНТНОСТИ НА МЕХАНИЗМ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ СИСТЕМЫ (Pr,La)Ni

В работе рассмотрено явление «наведенного магнитного упорядочения» в системе интерметаллического редкоземельного соединения PrNi. В рамках приближении среднего поля и случайных фаз (MF-RPA) получены дисперсионные энергии магнитных возбуждений для всех направлений высокой симметрии. Исследовано влияние замещения изовалентной немагнитной примесью в магнитной подрешетке на температуру магнитного фазового перехода в системе с наведенным магнетизмом.

P.S. SAVCHENKOV, P.A. ALEKSEEV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

INFLUENCE OF INTERMEDIATE VALENCE ON THE MECHANISM OF MAGNETIC ORDERING IN (Pr, La) Ni SYSTEM

The paper considers the phenomenon of “induced magnetic ordering” in the system of the intermetallic rare-earth compound PrNi. Within the framework of the approximation of the mean field and random phases approximation (MF-RPA), the dispersion energies of magnetic excitations for all directions of high symmetry are obtained. The effect of substitution by isovalent non-magnetic impurity in the magnetic sublattice on the temperature of the magnetic phase transition in a system with induced magnetism is investigated.

В работе изучается влияние различных дефектов в редкоземельной подрешетке на возникновение дальнего магнитного порядка в системе с исходно синглетным основным состоянием.

Для описания формирования дальнего магнитного порядка в системе с синглетным основным состоянием PrNi предложена трехуровневая модель, основывающаяся на развитии ранее предложенного подхода [1]. В приближение MF-RPA в рамках данной модели учтены реальная схема уровней Pr^{3+} и дипольные магнитные матричные элементы переходов между ними. В результате подгонки экспериментальных данных для одного

их направлений высокой симметрии, в котором наблюдается мягкая магнитная мода, получены значения констант обменного взаимодействия. Модель позволила получить разумное описание наблюдаемых особенностей дисперсии и интенсивности магнитных возбуждений для всех направлений высокой симметрии.

Предложен микроскопический подход к структурному моделированию влияния дефектов на ДМП в системе $(\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x)\text{Ni}$. В результате получена расчетная зависимость $T_c(x)$ для замещения Pr на немагнитный ион La, которая количественно лучше, чем для случая феноменологического подхода «серого атома» согласуется с результатами эксперимента. Переход в ферромагнитную фазу при замещении Pr на La при конечной температуре наблюдается при замещении вплоть до концентрации La $x=0.5$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-12-00133).

Список литературы

- [1] Алексеев П.А. , и др.// Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики 76.2 (2002): 110-114.

А.А. СИНЧЕНКО,^{1,2} П.Д. ГРИГОРЬЕВ³, П. МОНСО⁴

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка

³Институт Нееля ИЦНИ, Гренобль

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ТРИТЕЛЛУРИДАХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ АТОМОВ

Эффект Холла в соединениях трителлуридов редкоземельных элементов обнаруживает сильный гистерезис в режимах охлаждения и нагревания в области температур, соответствующих образованию второй однонаправленной волны зарядовой плотности (ВЗП). Показано, что этот эффект является результатом взаимодействия между двумя типами неустойчивости: пересечением зон p_x и p_y орбиталей Те квазидвумерной поверхности Ферми и пайерлсовской неустойчивостью. Снятие вырождений в электронном спектре и формирование низкотемпературной ВЗП имеют близкий масштаб выигрыша энергии и конкурируют между собой, что приводит к эффективному различию температур перехода в состояние с ВЗП при охлаждении и нагреве.

A.A. SINCHENKO¹, P.D. GRIGORIEV², P. MONCEAU³

¹Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

²L.D. Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka

³Institut NEEL, Grenoble, France

THE HALL EFFECT IN RARE-EARTH TRITELURIDE COMPOUNDS

The Hall effect of rare-earth triteluride compounds exhibits a strong hysteresis under cooling and heating in the temperature range corresponding to the formation of the second unidirectional charge density wave (CDW). It is shown that this effect is the result of an interaction between two types of instability: the intersection of the p_x and p_y of the Te orbitals of the quasi-two-dimensional Fermi surface and the Peierls instability. The hybridization in the electronic spectrum and the formation of a low-temperature CDW have a close energy gain scale and compete with each other, which leads to an effective difference in transition temperatures of the CDW during cooling and heating.

Пересечение энергетических зон электронов вблизи уровня Ферми приводит к вырождению и к эффектам снятия данного вырождения (антипересечению), результатом которого является появление необычных физических свойств. В настоящей работе исследована конкуренция такого

антипересечения и ВЗП в квазидвумерных соединениях семейства $R\text{Te}_3$ (R = редкоземельный атом). Состояние с ВЗП характеризуется пространственной модуляцией электронной плотности $\sim \cos(Qx + \varphi)$ и периодическим искажением решетки, приводящими к открытию щели, Δ , в электронном спектре. В приближении среднего поля для одномерных систем (1D), пайерлсовская неустойчивость обусловлена выигрышем энергии, который возникает в результате нестинга поверхности Ферми с $Q = 2k_F$ [1].

Для исследования были выбраны три соединения: TbTe_3 , как система с однонаправленной ВЗП и HoTe_3 и ErTe_3 с двунаправленными ВЗП. В TbTe_3 переход в состояние с ВЗП наблюдается при температуре $T_{\text{CDW1}} = 336$ К. В HoTe_3 и ErTe_3 первый и второй переходы ВЗП1 и ВЗП2 происходят при $T_{\text{CDW1}} = 283$ К и 270 К, и $T_{\text{CDW2}} = 110$ К и 160 К соответственно. Измерения эффекта Холла проводились методом ван-дер-Пао в диапазоне полей от +6,5 до -6,5 Т. Измерения проводились при фиксированной T в диапазоне температур 350-20 К с шагом $\Delta T = 10$ К.

В соединениях HoTe_3 и ErTe_3 обнаружен гистерезис константы Холла, R_H , в области температур, соответствующих второму пайерлсовскому переходу. В TbTe_3 зависимость $R_H(T)$ является полностью обратимой. При этом, зависимость электросопротивления от температуры является полностью обратимой во всем интервале температур для всех исследованных соединений.

Показано, что зонное антипересечение и ВЗП2 конкурируют, подавляя друг друга. При понижении температуры зонное антипересечение появляется первым и понижает температуру перехода ВЗП2. При более низкой температуре, когда ВЗП2 развивается и Δ увеличивается, зонное антипересечение уменьшается в пользу энергии ВЗП2. Данный процесс происходит как фазовый переход первого рода, сопровождающийся гистерезисом. Когда температура снова повышается, ВЗП2 исчезает при температуре превышающей температуру перехода при охлаждении, из-за изменившегося энергетического спектра. Это и приводит к гистерезису константы Холла, являющейся чувствительной даже к небольшой перестройке поверхности Ферми.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (17-52-150007 НЦНИ_a).

Список литературы

[1] Monceau P.// Adv. Phys. **61**, 325 (2012).

А.В. СКОБЁЛКИНА¹, Ф.В. КАШАЕВ¹, А.В. КОЛЧИН¹,
С.В. ЗАБОТНОВ¹, Л.А. ГОЛОВАНЬ¹, Т.П. КАМИНСКАЯ¹,
М.Ю. КИРИЛЛИН², А.В. ХИЛОВ², Д.А. КУРАКИНА²,
П.К. КАШКАРОВ¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

БИОФОТОНИКА КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ, СФОРМИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В ЖИДКОСТЯХ

Последовательным использованием методов электрохимического травления и абляции пико- и фемтосекундными лазерными импульсами сформированы кремниевые наночастицы. Показаны перспективы их использования в качестве фотoluminesцентных маркеров и контрастирующих агентов в методе оптической когерентной томографии для диагностики биологических объектов.

A.V. SKOBELKINA¹, F.V. KASHAEV¹, A.V. KOLCHIN¹,
S.V. ZABOTNOV¹, L.A. GOLOVAN¹, T.P. KAMINSKAYA¹,
M.YU. KIRILLIN², A.V. HILOV², D.A. KURAKINA²,
P.K. KASHKAROV¹

¹Lomonosov Moscow State University

²Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

BIOPHOTONICS OF SILICON NANOPARTICLES FORMED BY PULSED LASER ABLATION OF POROUS SILICON IN LIQUIDS

Silicon nanoparticles were formed by means of the electrochemical etching and pico- and femtosecond pulsed laser ablation techniques used consistently. Promises to use of them as photoluminescent markers and contrast agents in the optical coherent tomography technique for biological objects diagnostics are shown.

Кремниевые наночастицы (КНЧ) обладают рядом важных свойств для их использования в биомедицинских приложениях: биосовместимость, возможность адресной доставки, биodeградируемость, низкий уровень токсичности [1]. Свойства КНЧ зависят от способа и технологических параметров их получения. В данной работе пористый кремний, сформированный электрохимическим травлением, подвергался пико- или фемтосекундной лазерной абляции в дистиллированной воде, этаноле и жидком

азоте. В результате пикосекундной лазерной абляции удалось сформировать фракцию КНЧ с размером менее 20 нм (рис.1а) с характерной фотолюминесценцией (ФЛ) в интервале 650 – 900 нм (рис.1в), попадающей в диагностическое окно прозрачности биотканей, что свидетельствует о перспективности использования данных частиц в качестве ФЛ-маркеров. Численное моделирование показало, что для достижения наилучшего эффекта при визуализации биотканей методом оптической когерентной томографии (ОКТ) необходимо использование наночастиц с размером 70–200 нм[2]. Методом фемтосекундной лазерной абляции в данной работе были сформированы наночастицы с размерами 70 – 140 нм (рис.1б). Высокие значения коэффициентов светорассеяния, полученные при анализе данных спектрофотометрии (рис.1г), свидетельствуют о перспективности дальнейшего использования полученных КНЧ в ОКТ-диагностике.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: грант № 18-32-00884.

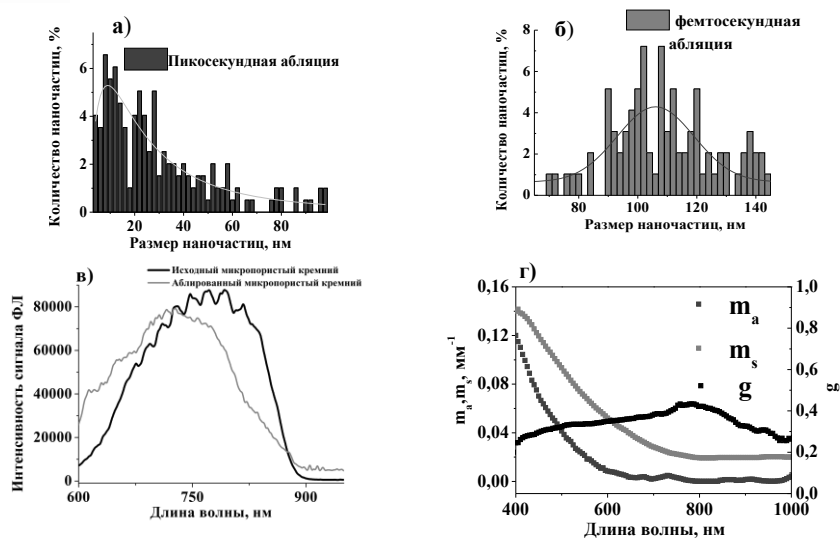


Рис. 1. Распределение по размерам (а) и ФЛ (в) КНЧ, полученных в результате абляции пористого кремния пикосекундными импульсами в этаноле. Распределение по размерам (б) и спектры коэффициентов поглощения μ_a , рассеяния μ_s и фактора анизотропии g (г) КНЧ, полученных в результате абляции мезопористого кремния фемтосекундными импульсами в этаноле.

Список литературы

- [1] Almeida P.V., Shahbazi M.A., Correia A., et al. // FutureMedicine. 2017. P. 34.
- [2] Заботнов С.В., Кашаев Ф.В., Шулейко Д.В. и др. // Квант. Эл. 2017. Т. 47, № 7. С. 638.

К.Л. СМЕРНОВ

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРАБОТКЕ СИАЛОНОВОЙ КЕРАМИКИ

Исследована возможность применения новых производительных и энергоэффективных методов для разработки сиалоновой керамики: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, механоактивация и искровое плазменное спекание. Установлены оптимальные режимы используемых процессов, обеспечивающие получение высокоплотной сиалоновой керамики без применения оксидных активаторов спекания.

K.L. SMIRNOV

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

THE DEVELOPMENT OF SIALON CERAMICS BY HIGH- ENERGY PROCESSES

Investigated were the possibility of new high productive and energy-efficient methods for the development of sialon ceramics: self-propagating high-temperature synthesis, mechanical activation and spark plasma sintering. Established were the optimal regimes to ensure the obtaining of high-density sialon ceramics without the use of oxide activators.

Керамика из твердых растворов на основе Si_3N_4 (сиалонов) характеризуется уникальным сочетанием высокой твердости, прочности и стойкости к износу/коррозии/термоудару/высокотемпературной ползучести [1]. В представленной работе исследовано применение ряда новых производительных и энергоэффективных методов для получения сиалоновой керамики: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), механоактивация (МА) и искровое плазменное спекание (ИПС). СВС сиалонов основан на фильтрационном горении в газообразном азоте реакционных смесей, содержащих порошки алюминия, кремния и соответствующих оксидов. Данный метод обеспечивают высокие скорости фазообразования при отсутствии сколько-нибудь значимых потерь массы, что позволяет получать порошки сиалонов заданного элементного и фазового состава, с высокой степенью однородности и широким диапазоном варьирования дисперсности и морфологии зерен [2]. Для получения мелкодис-

персного порошкового сырья для последующего спекания наиболее перспективны низкотемпературные режимы СВС [3]. Указанные режимы реализуются при низких давлениях азота и подразумевают повышенную реакционную способность исходных реакционных смесей, что может достигаться их предварительной МА. Также МА необходима и для обработки самих синтезированных порошков сиалонов, которые непосредственно после СВС находятся в сильно агломерированном состоянии. ИПС - это недавно разработанный процесс, в котором нагрев спекаемого образца и используемой пресс-формы осуществляется за счет прямого пропускания через них импульсов электрического тока. По сравнению с обычным горячим прессованием, ИПС позволяет существенно увеличить скорость нагрева и одновременно сократить время выдержки при максимальной температуре [4]. Проведенные исследования показали, что характеристики используемого порошка сиалона оказывают определяющее влияние на структуру и фазовый состав спеченной керамики. Использование мелкодисперсного порошка β - Si_3AlON_7 , синтезированного при начальном давлении азота 2 МПа и подвергнутого последующей МА в течении 5 минут, позволило получить высокоплотную керамику (относительная плотность не менее 98 %) с однородной мелкозернистой структурой уже при температуре изотермической выдержки 1550 °С. Относительная плотность керамики, полученной при той же температуре изотермической выдержки, из крупнодисперсного порошка аналогичного элементного состава, синтезированного при начальном давлении азота 10 МПа и подвергнутого МА в течении 5 минут, составляла не более 75 %. С увеличением максимальной температуры спекания до 1800 °С значение относительной плотности плавно росло, но не превышало 87 %. Появление вторичных агломератов в мелкодисперсном порошке при его длительной МА (синтез при начальном давлении азота 2 МПа и МА в течении 15 минут) также ограничивало возможность получения керамики с высокоплотной структурой (относительная плотность не более 93 %). Кроме того, данные образцы содержали и значительное количество примесных фаз, что можно напрямую связать с загрязнением используемого порошка в процессе МА из-за намола железа и взаимодействия с атмосферной влагой.

Список литературы

- [1] Ekström T. and Nygren M. // J. Am. Ceram. Soc., 1992, Vol. 75, № 2, P. 259–276.
- [2] Smirnov K.L. // Concise Encyclopedia of Combustion Synthesis: History, Theory, Technology, and Products, Eds: Borovinskaya I.P. et al., Elsevier, 2017, P. 333–335.
- [3] Zhao Y.S., et al. // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth., 2009, Vol. 18, № 2, P. 87–91.

А.В. СОЛДАТЕНКО^{1,2}, П.Н. ДЕГТЯРЕНКО²,
А.С. МАНКЕВИЧ¹, В.А. АМЕЛИЧЕВ¹, В.Н. ЧЕПИКОВ¹
¹ЗАО «СуперОкс», Москва, Россия
²ОИВТ РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ БУФЕРНЫХ СЛОЕВ НА ТЕКСТУРУ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ 2G ВТСП ЛЕНТ

Настоящая работа посвящена изучению процессов осаждения на металлическую ленту-подложку буферных слоев с архитектурой $\text{LaMnO}_3/\text{MgO-epi}/\text{MgO-IBAD}/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, предназначенных для последующего нанесения на них ВТСП слоя. Формирование текстуры слоя MgO обеспечивалось с помощью технологии IBAD (Ion Beam Assisted Deposition). Контроль качества текстуры в процессе роста пленок обеспечивался путем *in-situ* мониторинга дифракционной картины, полученной от дифракции быстрых электронов. Анализ пленок включал рентгеновскую дифракцию и измерения сверхпроводящих характеристик ВТСП. В экспериментах варьировались параметры роста слоя MgO , такие как толщина, а также скорость осаждения и ионного тока ассистирующего травления. Кроме того, была предпринята попытка изменения состава гетероструктуры путем замены слоя Y_2O_3 на слой LaMnO_3 , включая эксперименты по изменению его толщины.

A.V. SOLDATENKO^{1,2}, P.N. DEGTYARENKO²,
A.S. MANKEVICH¹, V.A. AMELICHEV¹, V.N. CHEPIKOV¹
¹JSC «SuperOx», Moscow, Russia
²JIHT RAS, Moscow, Russia

IMPACT OF THE DEPOSITION PARAMETERS OF THE BUFFER LAYERS ON THE TEXTURE AND SUPERCONTRACTING PROPERTIES OF INDUSTRIAL 2G HTSC TAPES

This work is devoted to the deposition processes research of buffer layers with architecture $\text{LaMnO}_3/\text{MgO-epi}/\text{MgO-IBAD}/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ designed for subsequent 2G HTSC deposition. Texture formation of MgO layer was obtained via IBAD (Ion Beam Assisted Deposition). Control of texture quality in thin film growth was provided with *in-situ* monitoring of diffraction pattern, obtained by RHEED (Reflectometry High Energy Electron Diffraction). Analysis of thin films included X-ray diffraction and measurements of superconducting properties of HTSC. Parameters of growth such as thickness, rate of deposition and ion current of assisting etching were varied in experiments.

In addition, we attempted to change the heterostructure by replacement of Y_2O_3 layer by LaMnO_3 , experiments of changing the LaMnO_3 thickness were carried out.

В работе проведены экспериментальные исследования буферных слоев, осажденных на металлическую ленту-подложку с архитектурой $\text{LaMnO}_3/\text{MgO-epi}/\text{MgO-IBAD}/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/$, предназначенных для получения 2G ВТСП лент. Проведен систематический анализ полученных пленок с помощью методов дифракции и измерения электрофизических характеристик ВТСП пленок, нанесенных на ленты с различной архитектурой. Контроль текстуры в процессе роста пленок обеспечивался путем *in situ* мониторинга дифракционной картины, полученной от дифракции быстрых электронов. Скорость роста слоя MgO измерялась с помощью кварцевых микровесов непосредственно в процессе роста. В экспериментах варьировались параметры роста слоя MgO , такие как толщина, а также скорость осаждения и ионного тока ассистирующего травления. Кроме того, была предпринята попытка изменения состава гетероструктуры путем замены слоя Y_2O_3 на слой LaMnO_3 , были проведены эксперименты по изменению его толщины.

Установлено, что в обоих случаях деградируют оба параметра текстуры – как в плоскости пленки, так и в перпендикулярной ей плоскости, при этом качество текстуры понижается с уменьшением толщины слоя MgO . В то же время по результатам измерения сверхпроводящих свойств выявлено, что уменьшение толщины слоя MgO вызывает сначала незначительное уменьшение критического тока (2% в случае толщины 70%), а затем оно становится больше (14% в случае пленки толщиной 50%). При этом одновременное увеличение на 20% скоростей осаждения и травления приводит к положительному изменению текстуры и критического тока за счет увеличения толщины пленки.

В качестве затравочного слоя для последующего осаждения текстурированного слоя MgO был апробирован LaMnO_3 . Были получены ленты с разной толщиной затравочного слоя LaMnO_3 (10нм, 50нм, 80нм). Установлено, что в зависимости от температурных условий осаждения слоя LaMnO_3 толщина, при которой его использование приводит к достижению критического тока, аналогичного критическому току образцов, полученных с использованием затравочного слоя Y_2O_3 , составляет не более 50-80нм.

А. СОЛОВЬЕВ¹, В. ФОМИНСКИЙ¹, В. ЗУЕВ¹, Р. РОМАНОВ¹,
А. ГОЙХМАН²

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

²*Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта,
Калининград, Россия*

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ГАЗОСЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ BC_x/SiC

Исследованы особенности токопрохождения в структуре, полученной методом импульсного лазерного осаждения тонкой пленки BC_x на монокристалл *n*-4H-SiC. Путем варьирования состава пленок BC_x установлены условия формирования структур, проявляющих омические и диодные характеристики. Исследованы температурные зависимости электрофизических свойств сформированных структур и их реакция на водород. Показана возможность получения эффективных датчиков водорода, функционирующих при температурах до 350 °C.

A. SOLOVIEV¹, V. FOMINSKI¹, V. ZUEV¹, R. ROMANOV¹,
A. GOYHMAN²

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

²*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

ELECTROPHYSICAL AND GAS-SENSITIVE PROPERTIES OF THIN-FILM BC_x/SiC STRUCTURES

Features of current transport in the structure obtained by pulsed laser deposition of a thin BC_x film on an *n*-4H-SiC single crystal were investigated. By varying the composition of the BC_x films, the conditions for the formation of structures exhibiting ohmic and diode characteristics were established. The temperature dependences of the electrophysical properties of the formed structures and their response to hydrogen are investigated. The possibility of obtaining efficient hydrogen sensors operating at temperatures up to 350 °C is shown.

Активное развитие технологий в области нано- и микроэлектроники требуют поиска новых материалов, работоспособных в осложненных условиях эксплуатации. Перспективными являются структуры на базе SiC, способные сохранять заданные характеристики при повышенных температурах. Известно, что легированные бором пленки углерода (BC_x) в зависимости от концентрации бора и структуры могут проявлять различные

интересные электрофизические свойства, но их поведение на перспективных SiC подложках остается малоизученным.

Пленки с химическим составом BC_x ($x \sim 1$ и $x \sim 3$) были получены методом импульсного лазерного осаждения из композитных мишеней бор-графит в вакууме и СВЧ разряде водорода (рис.1). Исследованы электрофизические характеристики структур BC/SiC и BC_3/SiC при 22 и 350°C в случае поперечного токопрохождения.

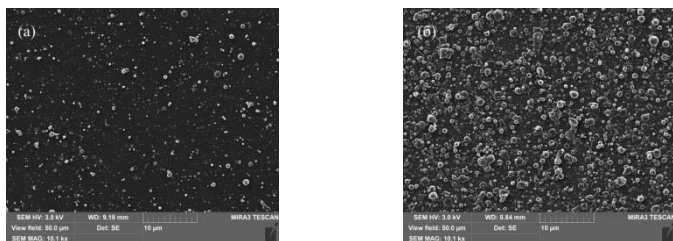


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения пленок BC_3 (а) и BC (б), полученных импульсным лазерным осаждением на SiC подложку при 450°C.

Характеристики ВАХ структур BC/SiC и BC_3/SiC при 22°C имеют ярко выраженные различия: для BC_3 вольтамперная характеристика имеет линейную зависимость, в то же время структура с пленкой BC - вид характерный для диодной структуры. При повышении температуры до 350 °C качественно зависимости не меняют своего вида, однако токи увеличиваются: для BC_3 это увлечение составляет ~ 10 раз, а для BC ~ 350 раз. Следует отметить, что в водородно-воздушной смеси с концентрацией H_2 равной 2% в структуре BC_3/SiC наблюдалось 10 кратное уменьшение величины тока по сравнению с величиной тока, измеряемой в воздушной среде. Данное наблюдение указывает на возможность создания высокотемпературного датчика водорода на базе структуры BC_3/SiC .

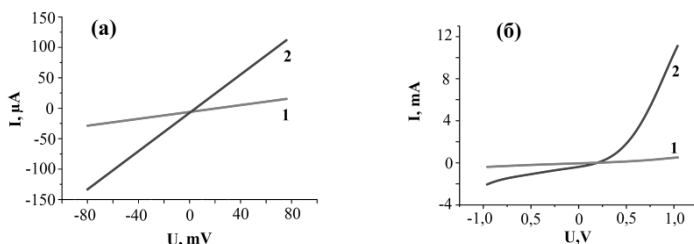


Рис. 2. ВАХ структур BC_3/SiC (а) и BC/SiC (б), измеренная при 22°C (кривая 1) и 350°C (кривая 2).

И.А. СОРОКИН^{1,2}, Д.В. КОЛОДКО^{1,2}, Е.Г. ШУСТИН¹,
В.А. ЛУЗАНОВ¹, М.П. ТЕМИРЯЗЕВА¹, Е.Н. МИРГОРОДСКАЯ¹

¹Фрязинский филиал ИРЭ РАН, Фрязино Московской обл., Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СИНТЕЗ ПЛЕНОК НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГРАФИТА В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Представлены результаты экспериментов по получению пленок нанокристаллического графита в тлеющем разряде с полым катодом на подложку $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}(111)$. Приведены характеристики разряда. Проведена характеристика получаемых слоев с помощью методов спектроскопии комбинационного рассеяния и атомно-силовой микроскопии. Измерена автоэлектронная эмиссия нанокристаллического графита. Выявлено наличие вертикально растущего графена.

I.A. SOROKIN^{1,2}, D.V. KOLODKO^{1,2}, E.G. SHUSTIN¹,
V.A. LUZANOV¹, M.P. TEMIRYAZEVA¹,
E.N. MIRGORODSKAYA¹

¹Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino Branch, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

SYNTHESIS OF NANO-CRYSTALLINE GRAPHITE FILMS IN HOLLOW CATHODE DISCHARGE

The results of experiments on the production of nano-crystalline graphite films on $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}(111)$ substrate in the hollow cathode discharge are presented. The characteristics of the discharge are given. The layers of the deposited graphite have been characterized by the methods of Raman scattering and atomic force microscopy. The field emission of nano-crystalline graphite was measured. The presence of vertically aligned graphene is revealed.

Пленки аморфного углерода, имеющие значительное содержание sp^3 -связей (DLC) находят широкое применение из-за свойств химической инертности, механической твердости, широкой запрещенной зоны (от ~0,5 эВ до ~4,0 эВ), которая может варьироваться, и возможности получения р- и n-проводимости [1, 2]. Некоторые из этих пленок имеют низкое значение порогового электрического поля автоэмиссии [3].

В работе предлагается новый способ получения пленок нанокристаллического графита, в котором осаждение графитовых слоев осуществляется в разряде с полым катодом (РПК) в атмосфере пропана. Здесь

полый катод образован двумя круглыми пластинами, расположенными на расстоянии 5 мм друг от друга. Образцы, на которые производится напыление графита, располагаются в углублении одной из пластин. Анодом является стенка вакуумной камеры. По вольт-амперной характеристике разряда были определены границы перехода в РПК для различных значений рабочего давления. Характеристика РПК практически не зависит от давления в широком диапазоне [4], что позволяет добиться хорошей воспроизводимости условий осаждения графита. Осаждение производится при давлении пропана 10 Па в течение 10-60 сек при температуре подложки 600 С на образцы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}(111)$, предварительно отожженные в водороде (давление - 1 Па, температура - 400°C).

Анализ кристаллической структуры, толщины и определение микро-структуры поверхности полученных слоев проводился с помощью раман-спектрометра и атомно-силового микроскопа (АСМ) (рисунок 1).

Форма спектра комбинационного рассеяния однородна по поверхности и соответствует спектру нано-кристаллического графита [5]. Рамановские спектры для серий образцов одинаковой обработки показали хорошую повторяемость. Толщина получаемых слоев составила 200 - 700 нм со средней шероховатостью 10 - 15 нм. АСМ выявил наличие вертикально растущих графеновых острий, толщина которых оказалась меньше толщины зонда АСМ. Оценена эмиссионная способность таких структур. Значения плотности тока (900 мкА/см^2 при поле 10 кВ/мм) сравнимы со значениями для современных образцов автокатодов [6-7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00884

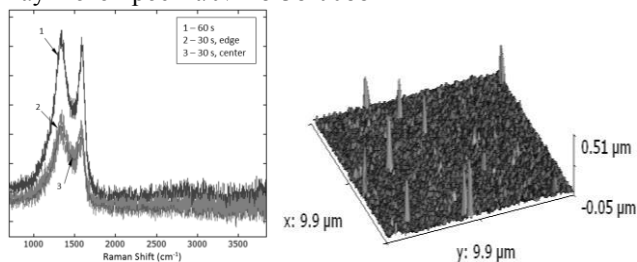


Рисунок 1.
Рамановские
спектры (сле-
ва) и АСМ
изображение
поверхности
графита (спра-
ва)

Список литературы

- [1] Robertson J. // Matertal Sci. and Engineering. 2002. Vol. 37. N 4-6. P.129-282
- [2] Milne W.I. // Semicond. Sci. Technol. 2003. Vol. 18. N 3. P. S81-S85.
- [3] Milne W.I., et al. // Int. J. Mod. Phys. 2000. Vol. 14. N 2-3. P. 301-307.
- [4] Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. М: Энергия, 1969. 184 с.
- [5] Chu P.K., Li L. // Mater. Chem. Phys. 2006. Vol. 96. N 2-3. P. 253-277.
- [6] Zhai C.X., et al. // Thin Solid Films. 2015. Vol. 574. P. 10-14.
- [7] Ha J.M., et al. // Nanoscale Research Letters. 2013. Vol. 8. N 1. P. 1-8.

Е.Ю. СОШИНСКАЯ¹, В.А. АНАШКИН², И.Д. ДЕЛЬЦОВ³,
Л.А. ДАДИНОВА¹

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

²НИИ ФХБ им. А.Н. Белозерского, Москва, Россия

³Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ CBS- ПИРОФОСФАТАЗЫ МЕТОДАМИ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ И МОЛЕКУЛЯРНОГО ДОКИНГА

Изучена структура пирофосфатазы семейства II, содержащей CBS-домены, из *Desulfitobacterium hafniense*. Была получена форма полноразмерного белка, состоящего из каталитической и регуляторной частей. Исследование проведено с помощью методов малоуглового рентгеновского рассеяния и молекулярного докинга.

E.Y. SOSHINSKAIA¹, V.A. ANASHKIN², I.D. DELTSOV³,
L.A. DADINOVA¹

¹FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia

²Belozersky Research Institute of Physico-Chemical Biology, MSU, Moscow, Russia

³Department of Chemistry, MSU, Moscow, Russia

STRUCTURAL STUDY OF CBS-PYROPHOSPHATASE USING SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING AND MOLECULAR DOCKING

The structure of pyrophosphatase family II containing CBS-domains from *Desulfitobacterium hafniense* was studied. The form of full-length protein, consisting of catalytic and regulatory parts, was obtained. The study was provided using small-angle X-ray scattering and molecular docking.

Неорганическая пирофосфатаза (PPase) является одним из важнейших белков любого организма. Она присутствует во всех известных организмах, в том числе в клетках человека. PPase семейства II обнаружены недавно (в 1998 году) в бактериях и археях. Интерес к пирофосфатазам семейства II обусловлен их потенциальной возможностью использования для создания лекарственных препаратов, поскольку эти ферменты обнаружены в человеческих патогенных микроорганизмах. Они структурно разнообразны. Часть последовательностей PPase семейства II содержат

регулирующую вставку, содержащую пару цистатионин β -синтазы (CBS) доменов в пределах одного из двух каталитических доменов и дополнительный DRTGG домен, функции которого до сих пор точно не определены. Регуляция CBS-PPase происходит по кооперативному механизму [1]. Однако установление основных регулирующих механизмов взаимодействия между доменами представляет большую проблему, поскольку данные о структуре полноразмерного фермента отсутствуют.

Методами молекулярного докинга и малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) была определена структура гомодимера белка CBS-PPase из *Desulfitobacterium hafniense* (dh-PPase) и проанализировано его поведение в растворе. Мы обнаружили, что dh-PPase в растворе существует в виде равновесной смеси нескольких олигомерных спиралевидных форм. Кроме того, ранее было выявлено, что введение мутации в каталитическую часть dh-PPase приводит к потере кинетической кооперативности у белка, при этом, как мы показали, в растворе мутированный белок образует структуры отличные от тех, что наблюдаются у нативного белка. Полученная в ходе исследования информация о структуре CBS-PPase позволит определить пути передачи информации между доменами белка, а также поможет ответить на ряд вопросов, связанных с особенностями регуляции ферментов через CBS домены.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-34-00918.

Список литературы

- [1] Anashkin V.A., Salminen A., Tuominen H., Orlov V.N., Lahti R., and Baykov A.A.// The Journal of Biological Chemistry. 2015. Vol. 290, P. 27594-27603.

А.С. СТАРИКОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.А. РУДНЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия*

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТОПОК ВТСП-ЛЕНТ С НАБОРАМИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Проведен ряд экспериментов по исследованию поведения силы левитации стопок ВТСП лент разной толщины над сборками постоянных магнитов различной конфигурации. Определено влияние взаимной ориентации и числа магнитов в массиве и положения стопок ВТСП лент относительно массива на величину и характер их силы взаимодействия.

A.S. STARIKOVSKII, M.A. OSIPOV, I.A. RUDNEV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

THE PECULIARITIES OF INTERACTION OF CC-TAPES STACKS WITH ASSEMBLIES OF PERMANENT MAGNETS OF VARIOUS CONFIGURATION

A number of experiments have been carried out to study the behavior of the levitation force of CC-tapes stacks of different thickness above the assemblies of permanent magnets of different configurations. The influence of the mutual orientation and the number of magnets in the array and the position of the CC-tapes stacks relative to the array on the magnitude and nature of their interaction force has determined.

Исследованы сверхпроводящие ленты второго поколения производства SuperOx. Ленты были разрезаны на квадратные фрагменты 12 мм×12 мм, и уложены в стопки различной толщины. Проведен ряд измерений силы взаимодействия ВТСП лент с массивами магнитов различных конфигураций. Измерение производилось при принудительном изменении расстояния между ними, для охлаждения использовался жидкий азот. Схему экспериментальной установки и подробности проведения измерений можно найти в [1]. В данном случае вместо стопки цилиндрических магнитов, изображенных на схеме, использовались блоки постоянных магнитов различной конфигурации. Измерения проводились над массивами магнитов, собранными тремя различными способами, как изображено на рисунке 1. В первом случае магниты располагались попеременно с противоположной поляризацией, во втором – все магниты изменяли поля-

ризацию попарно, в третьем – все магниты имели одинаковую поляризацию. Все эти массивы были собраны из 6 постоянных NdFeB магнитов с размерами 12мм×50мм×6мм. Измерения силы взаимодействия стопок лент с массивами проводились для различных значений количества лент в стопке и для различных положений стопки относительно центра сборки.

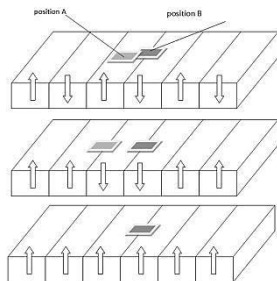


Рис.1. Различные варианты сборки магнитов.

Помимо стопок из квадратных фрагментов также проведены измерения силы левитации для длинных (60×12 мм) лент. Были получены кривые подвода для разного числа лент в стопке и для разного количества магнитов. Рассмотрены конфигурации из 9 и 5 магнитов и из 3 магнитов, проложенными между собой проставками шириной 12 мм. При измерении силы взаимодействия длинных лент массив собирался так, что соседние магниты были намагничены в противоположных направлениях.

В результате исследований обнаружено, что массив противоположно ориентированных магнитов увеличивает значение силы левитации по сравнению с массивом магнитов с одной ориентацией, а величина силы зависит от латерального положения стопки ВТСП лент. Максимальная сила соответствует положению стопки напротив границы магнитов, то есть положению с максимальным градиентом поля. Наибольшая сила левитации наблюдалась при измерениях над массивом, собранным из попарно сложенных магнитов. Таким образом, подбирая ширину противоположно намагниченных областей, можно добиться максимального значения силы левитации. Кроме того, было обнаружено, что сила левитации пропорциональна числу магнитов в массиве при малом числе лент в стопке, но выходит на насыщение при увеличении толщины стопки тем быстрее, чем больше магнитов в массиве.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 17-19-01527).

Список литературы

- [1] Abin D., et al., // IEEE Trans. Appl. Supercond., V. 26, no. 3, Art. ID. 8800504.

В.В. СЫЧУГОВ, Е.П. КРАСНОПЕРОВ, В.С. КОРОТКОВ,
А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО, С.В. ШАВКИН

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

ИЗУЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТЫ ВТСП ПРИ АКСИАЛЬНОМ СЖАТИИ ГАЛЕТНОЙ ОБМОТКИ

Изготовлена дисковая катушка (галета) из ВТСП провода шириной 4мм. При температуре жидкого азота измерен её критический ток. Изучена зависимость критического тока катушки от аксиального давления до 5 кН/см^2 (приложенная сила 50 кН), моделирующего силовое поле в сверхпроводниковом магните.

V.V. SYCHUGOV, E.P. KRASNOPEROV, V.S. KOROTKOV,
A.YU. DEGTIARENKO, S.V. SHAVKIN

National research center «Kurchatov institute», Moscow, Russia

THE RESEARCH OF CRITICAL PARAMETERS OF HTS TAPE IN DISC WINDING UNDER AXIAL COMPRESSION

The disc coil (pancake) was made from 4mm HTS YBCO conductor. Its critical current was measured at liquid nitrogen temperature. The dependency of critical current from axial pressure up to 5 kN/cm^2 was studied. The pressure models a force field in the real magnet.

Известно, что при работе электромагнита из-за пондеромоторных взаимодействий витков его обмотка испытывает радиальное растяжение и аксиальное сжатие. Для создания магнитной системы, состоящей из дисковых секций на основе ВТСП 2-го поколения ленты, было проведено изучение критических параметров ВТСП ленты при аксиальном сжатии силой до 50 кН. При таком воздействии моделировалась ситуация давления соседних секций магнита друг на друга.

Для проведения исследования был сконструирован криостат, позволяющий проводить одновременное приложения аксиального давления и измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ) сверхпроводящей ленты. Была намотана дисковая катушка из ВТСП провода шириной 4мм, стабилизированного медью, с количеством витков 40 шт., похожая катушка будет использована при намотке секций магнита для создания магнитной холодильной машины. ВТСП лента изготовлена в НИЦ «Курчатовский институт».

В работе представлены результаты исследования критического тока дисковой ВТСП катушки при температуре жидкого азота. Изучена зависимость токонесущей способности ленты от величины аксиального давления (до $p=5 \text{ кН/см}^2$ или 50 кН силы). Рассчитаны силы, действующие на секцию магнита в поле до 10 Тл. Проведено сравнение с модельной ситуацией, на рис.1 видно, что максимум нагрузки приходится на центральные секции, при этом напряжения на крайние секции меньше в 3 раза для заданного поля. Замечено, что при аксиальном давлении в $p=5 \text{ кН/см}^2$ наблюдается отслоение медного стабилизирующего слоя ленты.

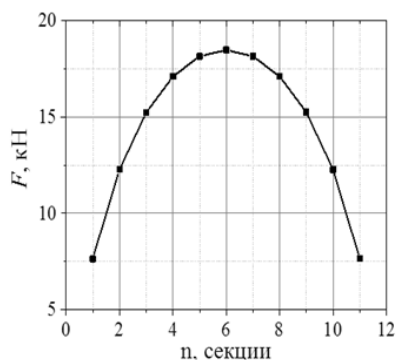


Рис. 1. График зависимости силы взаимодействия секций магнита от номера секции

«Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №14.604.21.0197 о предоставлении субсидии (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60417X0197)»

Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ,
Ж.Ш.СОДИКЖАНОВ, А.Н. УРОКОВ, У.Ф. ИБОДУЛЛАЕВ
*Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, Узбекистан*

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЯ ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛЕНОК CdS

В работе методом бомбардировки ионами Ar^+ на поверхности CdS получены нанопленки Cd с толщиной 10 – 12 Å. Показано, что полученные нанопленочные системы Cd – CdS имеют перспективы как при создании гетероструктур типа МДП, ПДП, так и в получении наноразмерных барьерных слоев и сверхтонких омических контактов на поверхности полупроводников.

D.A. TASHMUKHAMEDOVA, B.E. UMIRZAKOV,
J.Sh.SODIKJANOV, A.N. UROKOV, U.F. IBODULLAEV
Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

INFLUENCE OF THE ION BOMBARDMENT ON DENSITY OF THE CONDITION VALENTH BAND ELECTRONIS OF THE CdS FILMS

In this work by means of method of the bombardment of Ar^+ ions on surfaces CdS are received nanofilms of Cd with thickness of 10 - 12 Å. It is shown that of the system of got nanofilms Cd - CdS have a prospects as when making geterostructure of MIS, SIS types, so and in reception of the nanosized barrier layers and superthin omical contacts on semiconductor surfaces.

На основе пленок CdS в настоящее время изготавливаются различные виды датчиков, фотоэлементов, резонаторы излучения, солнечных элементов и др. Поэтому исследованию процессов формирования, морфологии, состава, структуры и свойств пленок (частиц) CdS и гетеросистемам на их основе посвящено большое число работ. Исследования проведенные в последние годы показывают, что наноразмерные структуры этих материалов также имеют большие перспективы в создании новых приборов твердотельной нанoeлектроники. Использование полупроводниковых материалов во многих случаях связано с получением на их поверхности однородных сплошных тонких пленок металлов или полупроводников с толщиной ~ 10 – 50 Å [1].

На рис. 1 приведен профиль распределения Ni по глубине чистой и ионно-бомбардированной пленки CdS. Видно, что в случае чистой пленки глубина проникновения Ni составляет до 400 – 500 Å.

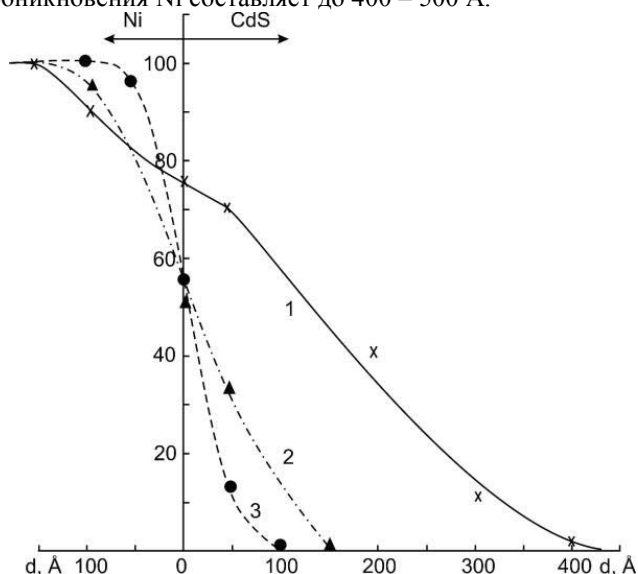


Рис. 1. Зависимость C_{Ni} по глубине чистого и ионно-бомбардированного CdS. 1 – Ni-чистый CdS, 2 – Ni-CdS, бомбардированный ионами Ag^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 3 – после отжига ионно-бомбардированного образца при $T = 900$ К в течении 30 мин. Толщина пленки никеля ~ 1000 Å.

После ионной бомбардировки она уменьшается до 3 – 4 раз. Постимплантационный отжиг при $T = 900$ К приводит к заметному увеличению глубины диффузии Ni относительно неотожженного образца. Однако, и в этом случае глубина проникновения Ni небольшая и не превышает 150 – 200 Å. Удельное сопротивление контактирующего слоя в системе Ni-CdS и Ni-Cd-CdS составляла ≤ 1 мкОм-см. При этом объемное удельное сопротивление системы металл-CdS практически не меняется и находится в пределах $\sim 5 \cdot 10^6$ Ом-см.

Список литературы

- [1] Мурадкaбилов Д.М., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 10. С. 58 – 62. [Muradkabilov D.M., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2013, Vol. 7, No. 5. P. 967–971].

Б.Е. УМИРЗАКОВ, Б.Д. ДОНАЕВ

*Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова,
Ташкент, Узбекистан*

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК GaAlAs/GaAs

Показано, что формирование на поверхности GaAs нанопленок GaAlAs приводит к увеличению значения коэффициента истинно-вторичных электронов (КИВЭ) δ и квантового выхода фотоэлектронов K .

B.E. UMIRZAKOV, B.D. DONAEV

Tashkent State Technical University named by I.Karimov, Tashkent city, Uzbekistan

METHODICAL ERRORS CAUSED BY SUPERPOSITION OF ELECTRICAL AND OPTICAL SIGNALS IN A HETERODYNE LASER INTERFEROMETER

It is shown that the formation of GaAlAs nanofilms on the GaAs surface leads to an increase the value of the true-secondary electron coefficient δ and the quantum yield of photoelectrons K .

Данная работа посвящена изучению энергетических и угловых зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ), коэффициентов отражения и поглощения света пленкой $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ /GaAs. В случае GaAs с нанопленкой $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$, несмотря на некоторое увеличение ϵ_f , значения δ_m и K заметно увеличиваются. Отметим, что плотность (в г/см^3) $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ на $\sim 20\%$ меньше, чем плотность GaAs. Однако плотность атомов (число атомов в 1 см^3) в GaAs и GaAlAs практически идентичны, и ионы элементов Ga и Al имеют почти одинаковые размеры. Поэтому $\eta_{\text{GaAs}} \approx \eta_{\text{GaAlAs}}$ и, следовательно, эмиссионные эффективности слоев GaAs и GaAlAs мало отличаются друг от друга. Тогда увеличение δ_m и K , в основном, могут быть обусловлено увеличением ширины запрещенной зоны и глубины зоны выхода λ истинно-вторичных электронов δ . В данной работе λ определялся методом снятия зависимости $\sigma_{800}(d)$. Где δ_{800} – значения δ при $E_p = 800 \text{ эВ}$, d - толщина пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$, выращенной на поверхности GaAs методом МЛЭ. λ для чистого GaAs определялась предварительно, и составила $\sim 100\text{-}120 \text{ \AA}$.

На рисунке приведены зависимости $\sigma_{800}(\phi)$ для чистого GaAs(111) и для GaAs с пленкой $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ с $d \approx 50 \text{ \AA}$, полученные двумя способами:

ионной имплантацией с сочетанием отжига и МЛЭ [1]. Видно, что во всех случаях с ростом ϕ происходит немонотонный рост значения σ_{800} , то есть на зависимости $\sigma_{800}(\phi)$ наблюдаются максимумы и минимумы, положения которые соответствуют определенным кристаллографическим направлениям. Угловые положения максимумов GaAs и GaAlAs, полученные методом ионной бомбардировки хорошо совпадают друг с другом. Поэтому можно сделать вывод, что в данном случае происходит строгий эпитаксиальный рост пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$. В случае МЛЭ пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ на зависимости $\delta_{800}(\phi)$ интенсивности пиков, характерных для GaAs существенно уменьшается, вблизи этих пиков появляются новые пики. Изучение зависимости $\sigma(\phi)$, снятых при различных E_p показали, что при $E_p \approx 200$ эВ глубина выхода ИВЭ составляет ~ 50 Å. При этом на кривых зависимостей $\delta(\phi)$ пики GaAs полностью исчезают, а интенсивности пиков GaAlAs существенно увеличиваются.

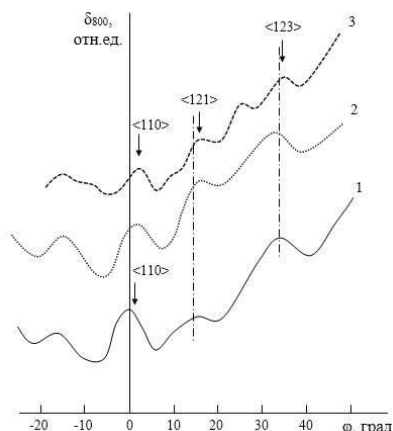


Рис. 1. Зависимости $\delta_{800}(\phi)$ для чистого GaAs (кривая 1) для GaAs с пленкой $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ толщиной 50 Å, полученные методом ионной имплантации (кривая 2) и МЛЭ (кривая 3).

Глубина зоны выхода ИВЭ и фотоэлектронов для GaAs составляет $\sim 100\text{-}120$ Å, а для пленки $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ – $150\text{-}160$ Å. Значение коэффициентов η соответственно для GaAs и $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ практически идентичны, а значения коэффициентов ИВЭ δ_m отличаются на 20-25 %. Коэффициент отражения света K во всей исследованной области длины волны (как в области поглощения, так и в области максимального отражения) GaAlAs был до 2 раза больше чем GaAs.

Список литературы

- [1] Donaev S. B., Umirzakov B. E, Tashmukhamedova D. A. // Technical Physics, Volume 60, Issue 10, pp 1563–1566

Б.Е. УМИРЗАКОВ, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА,
М.Б. ЮСУПЖОНОВА, Х.Х. БОЛТАЕВ, Ш.А. СУЯРКУЛОВ,
*Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,
Узбекистан*

ВЛИЯНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ ТОНКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА Si (111)

Впервые методом измерения зависимости коэффициента η от E_p изучены степень разупорядоченности и толщина разупорядоченных слоев d монокристаллического Si (111) при бомбардировке ионами Ar^+ . Показано, что значение d при энергии ионов $E_0 = 1$ кэВ и 2 кэВ составляет $\sim 100 - 120 \text{ \AA}$ и $150 - 160 \text{ \AA}$. При этом плотности состояния электронов валентной зоны Si (111) существенно изменяются, уменьшается коэффициент прохождения света до 55 – 60 %, а значение E_g существенно не меняется.

B.E. UMIRZAKOV, D.A. TASHMUKHAMEDOVA,
M.B. YUSUPJANOVA, K.K. BOLTAEV, Sh.A. SUYARKULOV
Tashkent State Technical University, 100095 Tashkent, Uzbekistan

INFLUENCE OF THE MISSEQUENCING OF THE THIN SURFACE LAYERS ON ELECTRONIC CHARACTERISTICS OF Si (111)

For the first time method of the measurement to dependencies of the factor η from E_p studied degree of the missequencing and thickness missequencing layers d monocrystal Si (111) when bombarded surfaces with ions of Ar^+ . It has shown that amount of d at energy ion $E_0 = 1$ keV and 2 keV forms $\sim 100 - 120 \text{ \AA}$ and $150 - 160 \text{ \AA}$. In this case, at density of the condition of valent band electrons of Si (111) greatly change, decreases the factor of the passing of the light before 55 - 60 %, but importance E_g greatly is not changed.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению оптических и электронных свойств полупроводников с нанопазами и нанопленками на поверхностных слоях. В частности, в работе [1] изучены зонно-энергетические параметры наноразмерных структур, созданных на поверхности Si, GaAs и CaF_2 методом низкоэнергетической ионной имплантации. 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.

Поэтому основной целью данной работы является исследование влияния образования наноразмерных фаз в приповерхностной области монокристаллов Si (111) при бомбардировке ионами Ag^+ с $E_0 = 0,5 - 2$ кэВ на плотности состояния валентных электронов и параметры энергетических зон.

На рис. 1 приведены фотоэлектронные спектры ($h\nu = 10,8$ эВ) для Si (111) измеренных до и после бомбардировки ионами Ag^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

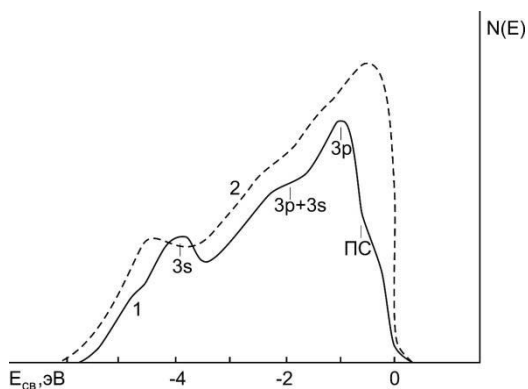


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры измеренные при $h\nu = 10,8$ эВ для пленки Si (111) до (кривая 1) и после бомбардировки ионами Ag^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2).

Из рис. 1 видно, что аморфизация приводит к резкому изменению плотности состояния валентных электронов. В частности, положение основного максимума смещается на $0,4 - 0,5$ эВ в сторону потолка валентной зоны. При этом ширина спектра ΔE увеличивается на $0,2 - 0,3$ эВ, а квантовый выход фотоэлектронов (площадь под кривой энергетического распределения) увеличивается на $25 - 30 \%$. На основе анализа спектров фотоэлектронов Si можно определить основные параметры энергетических зон.

Список литературы

- [1] Donaeв S.B., Djurabekova F., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. // Phys. Status Solidi C 12, No. 1–2, 89–93 (2015).

Б.Е. УМИРЗАКОВ, Ё.С. ЭРГАШОВ

*Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,
Узбекистан*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ БОМБАРДИРОВКИ ИОНАМИ
 Ar^+ НА СПЕКТР ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
МОНОКРИСТАЛЛА Si(111)**

В работе изучено влияние разупорядочения приповерхностных слоев на электронные и оптические свойства монокристаллического кремния. Анализ спектров фотоэлектронов показали, что при полной аморфизации поверхности плотности состояния валентных электронов Si существенно изменяется. В частности положение основного максимума электронов валентной зоны Si(111) смещается на $\sim 0,4$ eV в сторону больших энергий связи и ширина запрещенной зоны E_g увеличивается на 0,1-0,15 эВ. Дано теоретическое обоснование полученных экспериментальных результатов. Изучено также влияния разупорядочения поверхностных слоев на оптические свойства.

B.E. UMIRZAKOV, Y.S. ERGASHOV

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION
OF THE INFLUENCE OF ION BOMBARDMENT Ar^+ ON THE
RANGE ELECTRON SPECTRUM OF SINGLE CRYSTAL Si
(111)**

The influence of the disordering of the surface layers on the electronic and optical properties of single-crystal silicon has been studied. An analysis of the photoelectron spectra showed that with complete amorphization of the surface, the density of the state of the valence electrons of Si varies significantly. In particular, the positions of the main maximum of the electrons of the valence band of Si (111) shift by ~ 0.4 eV towards higher binding energies and the band gap E_g increases by 0.1-0.15 eV. The theoretical substantiation of the obtained experimental results is given. Were also studied the effects of the disordering of the surface layers on the optical properties.

Данная работа посвящена для экспериментальному изучению влияния разупорядочения кристаллической решетки поверхности монокристаллического Si(111) на его электронную структуру и оптические свойства а также дать теоретические объяснение полученных экспериментальных результатов.

Объектом исследования являлся монокристаллический Si(111) *p* типа. Разупорядочение поверхности Si(111) осуществлялось бомбардировкой ионами Ar^+ с энергией $E_0 = 1 \text{ keV}$ с вариацией дозы ионов в пределах 10^{13} – до 10^{16} cm^{-2} .

Бомбардировка Ar^+ проводилась перпендикулярно к поверхности. При ионной бомбардировке состав поверхности Si практически не меняется, поэтому наблюдаемые изменения в основном объясняются разупорядочением поверхности и приповерхностных слоев. При $D = 6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ происходит полная аморфизация. Однако все особенности характерные для аморфного Si устанавливались при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ и дальнейшее увеличение D практически не приводит к изменению спектра фотоэлектронов.

В таблице представлены значения ширины запрещенной зоны E_g и коэффициента пропускания света K для монокристалла Si(111), измеренные до и после аморфизации поверхности.

Таблица 1 Значения E_g и K для Si(111) измеренные до и после разупорядочения поверхности

Образец	Структура поверхности	$E_g, \text{эВ}$	K, в %	
			$h\nu = 0,8 \text{ эВ}$	$h\nu = 1,5 \text{ эВ}$
Si(111)	Монокристалл	1,1	85 ± 5	5 ± 1
$\text{Ar}^+ \rightarrow \text{Si(111)}$	Аморфная	1,25	40 ± 5	5 ± 1

Из таблицы видно при разупорядочении поверхности ширина запрещенной зоны E_g немного увеличивается. Несмотря на это значение K при $h\nu < E_g$ существенно уменьшается (следовательно, коэффициент поглощения увеличивается), что в основном обусловлено появлением и увеличением концентрации различных энергетических уровней в запрещенной зоне вследствие разупорядочения поверхности.

Д.В. ФИЛИПЧУК^{1,2}, А.В. ЛИТВИНОВ¹, А.А. МИХАЙЛОВ²,
М.О. ЭТРЕКОВА^{1,2}

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

²*ООО «НПФ «ИНКРАМ», г. Москва, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА ПОКАЗАНИЯ ГАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ МДП-СЕНСОРА

Известно, что МДП-сенсоры способны реагировать на изменение давления паров воды в окружающем воздухе, причем значение отклика сенсоров может быть сравнимо со значением отклика на ПДК целевого компонента (а в отдельных случаях превышать это значение), что может вызвать ложные срабатывания газоанализатора на основе МДП-сенсора при работе в реальных условиях. В рамках данной работы был предложен и испытан метод корректировки показаний по давлению паров воды в окружающем воздухе. Данный метод позволяет снизить отклик на изменение давления паров воды примерно в 6 раз по сравнению с начальным значением.

D.V. FILIPCHUK^{1,2}, A.V. LITVINOV¹, A.A. MIKHAILOV²,
M.O. ETREKOVA^{1,2}

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

²*Scientific production company "INKRAM", Moscow, Russia*

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CHANGING THE RELATIVE HUMIDITY ON READINGS OF THE GAS DETECTOR BASED ON MIS-SENSOR

It's known that MIS-sensors are able to respond to changes in the water vapor pressure in ambient air, and the response value of the sensors can be comparable to the response value of the target component's, which can cause false triggers of the gas analyzer based on the MIS-sensor in real conditions. As part of this work, a method for correcting indications for the pressure of water vapor in ambient air was proposed and tested. This method allows to reduce the response to the change in water vapor pressure by 6 times compared with the initial value.

Известно, что МДП-сенсоры способны реагировать на изменение давления паров воды в окружающем воздухе [1], причем значение отклика

сенсоров может быть сравнимо со значением отклика на ПДК целевого компонента, что может вызвать ложные срабатывания газоанализатора на основе МДП-сенсора при работе в реальных условиях. Был собран экспериментальный детектор на основе МДП-сенсора, который способен обнаруживать концентрации таких веществ, как гидразин, аммиак, диоксид азота, сероводород и др. и проверена его работа в условиях изменяющейся относительной влажности окружающего воздуха (и, как следствие, давления паров воды). Значение этого параметра определялось при помощи датчика относительной влажности и температуры, встроенного в газовый тракт устройства.

Для приготовления газовых смесей с различным значением давления паров воды был собран генератор влажного газа (ГВГ). Данный генератор позволяет устанавливать значение относительной влажности газовой смеси от 1 до 97 %.

Показано, что отклик детектора на резкое изменение значения относительной влажности воздуха на 40 % сравним с откликом на предельно допустимую концентрацию аммиака в жилой зоне ($0,2 \text{ мг/м}^3$) [2].

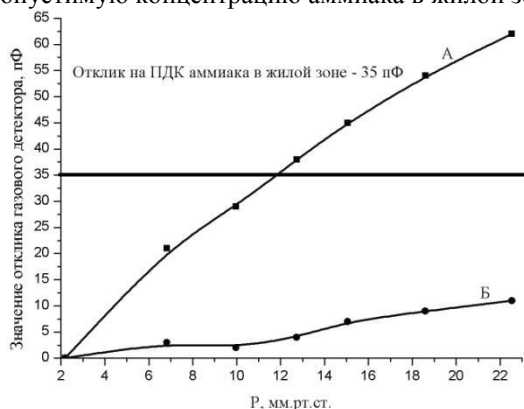


Рис.1. Статические характеристики детектора по парциальному давлению паров воды. Кривая «А» - при отсутствии коррективки, кривая «Б» - при наличии коррективки. Горизонтальной линией отмечено значение отклика детектора на ПДК аммиака в жилой зоне.

Предложен метод коррективки показаний экспериментального детектора в зависимости от изменения относительной влажности окружающего воздуха, позволяющий уменьшить отклик МДП-сенсора в 6 раз, по сравнению с отсутствием коррективки (рис.1).

Список литературы

- [1] Емелин Е.В., Жарковский А.Е., Николаев И.Н. // Сенсор, 2008, № 3, с. 15-18.
- [2] Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.695-98 «Предельно допустимые концентрации (ПДК р.з.) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».

Д.В. ФОМИНСКИЙ¹, О.В. КОМЛЕВА¹, В.Н. НЕВОЛИН²,
Р.И. РОМАНОВ¹, В.Ю. ФОМИНСКИЙ¹,
Н.А. РУБИНКОВСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия

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

БИФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ КАТАЛИЗАТОР Mo-Ni-S ДЛЯ РАСЩЕПЛЕНИЯ ВОДЫ

Приведены результаты электрохимических и структурных исследований тонких пленок Mo-Ni-S, полученных с применением комплекса методов физического осаждения и химического синтеза из паровой фазы на подложках из пористого никеля и стеклоглуглерода. Определены условия получения и состав пленок, обеспечивающих высокую эффективность как катодной, так и анодной реакции, обуславливающих выделение водорода и кислорода, соответственно, в щелочном растворе.

D.V. FOMINSKI¹, O.V. KOMLEVA¹, V.N. NEVOLIN²,
R.I. ROMANOV¹, V.Y. FOMINSKI¹, N.A. RUBINKOVSKI¹

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

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

BIFUNCTIONAL THIN-FILM Mo-Ni-S CATALYST FOR OVERALL WATER SPLITTING

The results of electrochemical and structural studies of thin Mo-Ni-S films that were obtained by using the complex methods of physical deposition and chemical synthesis from the vapor phase on substrates of porous nickel and glassy carbon are presented. The preparation conditions and compositions of the films, which provide high efficiency of both the cathodic and anodic reactions, causing the evolution of hydrogen and oxygen, respectively, in an alkaline solution, are determined.

Поиск и получение новых тонкопленочных материалов, способных заменить дорогостоящие и редкие металлы, такие как Pt, Ru, применяемые в электрокатализаторах расщепления воды, является крайне актуальной задачей альтернативной энергетики. Обоснованные надежды связываются в настоящее время с сульфидами переходных металлов.

В работе проведен комплекс исследований по формированию наноструктурированных тонкопленочных катализаторов, содержащих Mo, Ni и S. Исследовано влияние структурного и химического состояния композитных и слоистых тонкопленочных катализаторов Mo-Ni-S, формируемых на носителях из пористого никеля и стеклоуглерода. Для получения катализаторов использовалась комбинация методов, включающих импульсное лазерное осаждение (ИЛО), в том числе реактивное, компонентов/прекурсоров катализатора и термохимическую обработку в парах серы или сероводороде. На рис. 1 представлены характерные результаты измерения катодных и анодных вольтамогрaмм в растворе 1М КОН для пленок-катализаторов, созданных на пористом никеле по различным регламентам. Аморфные пленки а-MoS_x создавались методом ИЛО при 22°C, а кристаллические с-MoS_x – методом реактивного ИЛО в H₂S при повышенных температурах или отжигом.

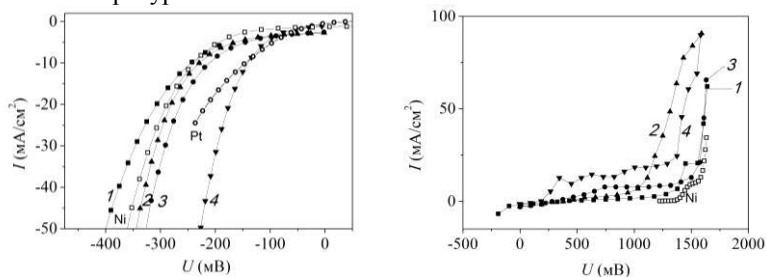


Рис. 1. Катодные (а) и анодные (б) вольтамогрaммы для катализатора Mo-Ni-S: 1 – а-MoS_x/Ni; 2 – с-MoS_x/NiS_y/Ni; 3 – а-MoS_x/NiS_y/Ni; 4 – с-MoS_x/MoNiS₂/NiS_y/Ni.

Полученные результаты показали, что при получении H₂ эффективность катализаторов возрастает при изменении их структуры в следующей последовательности: а-MoS_x/Ni – а-MoS_x/NiS_y/Ni (или с-MoS_x/NiS_y/Ni) – с-MoS_x/MoNiS₂/NiS_y/Ni. Тройное соединение MoNiS₂ могло формироваться при термохимической обработке в сероводороде двухслойной пленки. Пленка с таким составом оказалась наиболее активной при выделении O₂ на аноде. Значения перенапряжения выделения водорода (10 мА/см² при 132 мВ) и кислорода (150 мВ) на таких катализаторах превосходили величины, полученные на современных 3D-структурах из нано-лепестков Mo-Ni₃S₂ [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-2-00191а).

Список литературы

[1] Wu C., Liu B., Wang J. et al.// Appl. Surf. Sci. 2018. Vol. 441, P. 1024–1033.

А.В. ФРОЛОВ¹, А.П. ОРЛОВ^{1,2}, В.А. ШАХУНОВ¹,
А.А. СИНЧЕНКО^{1,3}, П. МОНСО⁴

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия*

²*Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия*

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

⁴*Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut NEEL, Grenoble, France*

ПИК-ЭФФЕКТ В КВАЗИДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ВОЛНОЙ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ RTe_3

Исследованы эффекты скольжения волны зарядовой плотности в квазидвумерном проводнике TbTe_3 в широком интервале температур. Обнаружено, что при выдерживании образца при определённой температуре T_0 ниже температуры пайерлсовского перехода зависимость порогового поля $E_t(T)$ становилась немонотонной, демонстрируя сильный максимум при $T = T_0$. После нагрева образца до температуры пайерлсовского перехода зависимость $E_t(T)$ возвращалась к классическому для этих соединений линейному виду. Наблюдаемый эффект воспроизводим и, вероятно, связан с формированием при выдерживании упорядоченной структуры дефектов волны зарядовой плотности и её плавлением при нагреве.

A.V. FROLOV¹, A.P. ORLOV^{1,2}, V.A. SHAKHUNOV¹,
A.A. SINCHENKO^{1,3}, P. MONCEAU⁴

¹*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia*

²*Institute of Nanotechnology of Microelectronics of RAS, Moscow, Russia.*

³*Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut NEEL, Grenoble, France*

PEAK EFFECT IN QUASI-TWO-DIMENSIONAL MATERIALS WITH CHARGE DENSITY WAVE RTe_3

The effects of charge density wave sliding in a quasi-two-dimensional conductor TbTe_3 are studied in a wide temperature range. It was found that when the sample was kept at a certain temperature T_0 below the Peierls transition temperature, the dependence of the threshold field $E_t(T)$ became nonmonotonic, showing a strong maximum at $T = T_0$. After the sample was heated to the Peierls transition temperature, the $E_t(T)$ dependence returned to the linear form which is typical for these compounds. The observed effect is reproducible and is associated with the formation of an ordered structure of the defects of the charge density wave during keeping, and its melting when heated.

Одним из наиболее интересных свойств материалов с волной зарядовой плотности (ВЗП) является её коллективное движение (скольжение). Данный эффект, проявляющийся в резком возрастании проводимости в полях выше порогового $E > E_t$, хорошо изучен в квазиодномерных соединениях [1]. Лишь недавно скольжение ВЗП удалось достоверно наблюдать в ряде квазидвумерных соединений из семейства трителлуридов редкоземельных элементов $R\text{Te}_3$ (R : La, Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Er, Tm) [1,2].

В данной работе особое внимание было уделено трителлуриду тербия, в котором переход в состояние с ВЗП происходит при температуре $T_{\text{CDW}} = 336 \text{ K}$ в направлении $Q_{\text{CDW}} = (0,0,1)$. Для исследования электронного транспорта были изготовлены четырёхконтактные мостиковые структуры с характерными размерами $250 \times 100 \times 0.5 \text{ мкм}$, ориентированные вдоль направления ВЗП. Структуры вырезались сфокусированным ионным пучком из монокристаллов TbTe_3 , предварительно утоненных до субмикронных толщин [3]. Использование структур с микронным сечением позволило уменьшить нагрев образца при достижении порогового поля и тем самым наблюдать скольжение ВЗП в более широком диапазоне температур.

Измерения проводились следующим образом: сначала образец нагревался до температуры, превышающей T_{CDW} , после чего охлаждался до низких температур, и измерялись его вольт-амперные характеристики (ВАХ) при повышении температуры с шагом 10 K . В таком случае пороговое поле E_t линейно возрастало с понижением T , что согласуется с результатами [4].

Однако после выдерживания образца при определённой температуре T_0 ($T_0 < T_{\text{CDW}}$) в течение длительного времени результаты кардинально менялись: пороговое поле существенно возрастало во всем диапазоне температур, с сильным максимумом при $T = T_0$. После нагрева образца до температуры выше T_{CDW} , зависимость $E_t(T)$ вновь принимала линейный вид.

Обнаруженные немонотонные зависимости $E_t(T)$ напоминают пик-эффект (немонотонная зависимость критического тока от магнитного поля или от температуры в магнитном поле), наблюдаемый в сверхпроводниках, и связываются нами с формированием упорядоченной структуры (решётки) дефектов ВЗП и её плавлением при нагреве.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант #18-02-00295).

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. //JETP Letters. – 2018. – Vol. 107. – №. 8. – . 488-492.
- [4] Sinchenko A. A. et al. //Solid State Communications. 2014. Vol. 188. P. 67-70.

А.М. ФРОЛОВ, Т.М. ФАЛЯХОВ, С.В. ПЕТУХОВ
Объединенный Институт Высоких Температур, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАРБИДА ТАНТАЛА И ГРАФИТА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ СВЫШЕ 4000 К

В работе представлены результаты экспериментального исследования испарения изотропного графита, а также $TaC_{0.8}$ и TaC_1 . С использованием комбинации лазерного нагрева миллисекундными импульсами и времяпролетной масс-спектрометрии было изучено изменение состава пара этих веществ в зависимости от температуры. Впервые измерены относительные парциальные давления отдельных компонентов паров над поверхностью твердого и жидкого TaC_x и изотропного графита при температуре выше 3500 К и рассчитаны соответствующие энтальпии испарения.

A.M. FROLOV, T.M. FALYAKHOV, S.V. PETUKHOV
Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF EVAPORATION OF TANTALUM CARBIDE AND GRAPHITE AT TEMPERATURES ABOVE 4000 K

The results of experimental investigation of evaporation of isotropic graphite, $TaC_{0.8}$ and TaC_1 are presented. Using the combination of laser heating with millisecond pulses and time-of-flight mass spectrometry the evolution of vapor composition of the substances with temperature was investigated. For the first time relative partial pressures of different vapor species over solid and liquid TaC_x and isotropic graphite at temperatures above 3600 K were measured along with the corresponding enthalpies.

Поиск новых и применение известных материалов для эксплуатации в экстремальных условиях требует знания их высокотемпературных свойств и характеристик. Одной из наиболее важных при этом является скорость уноса вещества при испарении его с поверхности. Для большинства тугоплавких веществ такие данные в области близкой к точке плавления и выше нее не представлены. Однако применение лазерного нагрева миллисекундными импульсами в сочетании с быстродействующей времяпролетной масс-спектрометрией позволяет получать данные по испарению тугоплавких веществ, например, графита вплоть до 4100 К [1].

В настоящей работе с помощью метода, являющегося дальнейшим развитием [1], исследовано испарение двух тугоплавких веществ – графита и карбида тантала. Мелкокристаллический графит МПГ-7 выбран как материал с относительно хорошо известными свойствами при высоких

температурах. Карбид тантала из-за высокой температуры плавления и высокой теплопроводности является перспективным материалом для эксплуатации при экстремальных тепловых нагрузках. Образцы карбида тантала TaC_x двух составов ($x=0.8$ и 1) были изготовлены методом прямого синтеза из порошков углерода и тантала. Далее, используя нагрев лазерным импульсом (около 500 мс) в инертной атмосфере, часть образца была переплавлена для получения слоя плотного карбида толщиной несколько сотен микрон. Одновременно была измерена излучательная способность в твердом и жидком состояниях методом полихроматической пирометрии в широкой области спектра. В экспериментах по испарению использовались лазерные импульсы длительностью около 20 мс. Температура измерялась с помощью яркостного микропирометра на длине волны 905 нм. Были получены температурные зависимости относительных парциальных давлений отдельных молекулярных компонентов, из которых были рассчитаны энтальпии испарения и относительные давления. Для карбида тантала было получено отношение количества атомов углерода и тантала (Рис. 1).

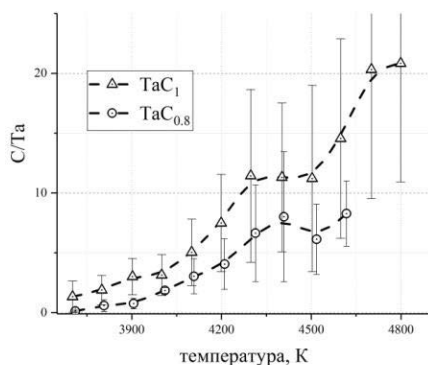


Рис. 1. Соотношение атомов углерода и тантала в парах TaC_x

Показано, что доля углерода в парах карбида тантала разных составов резко нарастает при приближении к температуре плавления. Проведен сравнительный анализ скорости уноса вещества для графита и TaC_x при разных температурах.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-38-00837.

Список литературы

- [1] Pflieger R., Sheindlin M., Colle J.-Y. // Int. J. Thermophys. 2005. Vol. 26, № 4, p 1075-1093

А.М. ФРОЛОВ, М.А. ШЕЙНДЛИН, А.А. ВАСИН
Объединенный Институт Высоких Температур, Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУБЛИМАЦИИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА И ГРАФИТА МПГ-7 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ СВЫШЕ 3500 К

В работе приведены данные по составу паров, энтальпиям сублимации и температурным зависимостям относительных парциальных давлений различных компонентов паров графита марки МПГ-7 и пучка углеродных волокон. Измерения проводились методом времяпролетной масс-спектрометрии с лазерным нагревом миллисекундными импульсами. Проведен сравнительный анализ скорости уноса вещества с разных поверхностей пучка углеродных волокон и мелкозернистого графита.

A.M. FROLOV, M.A. SHEINDLIN, A.A. VASIN
Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

COMPARATIVE ANALYSIS OF SUBLIMATION OF CARBON FIBERS AND MPG-7 GRAPHITE AT TEMPERATURES ABOVE 3500 K

Experimental data on vapor composition, sublimation enthalpies and temperature dependences of relative partial pressures of different molecular species in vapor over MPG-7 and a carbon fiber bundle are presented. The measurements were performed using time-of-flight mass-spectrometry with a laser-pulsed heating of a few milliseconds. The comparative analysis of the sublimation rate from different surfaces of a carbon fiber bundle and MPG-7 graphite is performed.

Особенности испарения различных углеродных материалов при температурах, превышающих 3500 К практически не изучены, что связано с техническими ограничениями классической высокотемпературной масс-спектрометрии. Так, известные стационарные методы нагрева и соответствующая аппаратура позволяет исследовать испарение вещества при температурах не превышающих 3000 К [1]. Существенно расширить диапазон температур удастся с помощью лазерного нагрева, длительностью порядка 10 мс, в сочетании с быстрой времяпролетной масс-спектрометрией, что позволило изучить молекулярный состав пара при сублимации с базовой плоскости пирографита вплоть до 4100 К [2].

В настоящей работе впервые проведен количественный анализ сублимации образца, представляющего собой пучок углеродных волокон, и

графита МПГ-7 в диапазоне температур 3500–4000 К. Исследуемые образцы нагревались лазерным импульсом длительностью около 20 мс, в течение которого измерялась температура поверхности методом яркостной пирометрии, а также с частотой 50 кГц регистрировались масс-спектры паров. Одновременная регистрация температуры и масс-спектров позволила изучить эволюцию состава паров с ростом и падением температуры. Были получены относительные парциальные давления компонентов пара и рассчитаны их энтальпии сублимации. Показано, что сублимация происходит в режиме близком к свободномолекулярному. На рисунке 1 приведена температурная зависимость отношения концентрации молекулы C_3 при испарении различных поверхностей пучка углеродных волокон к концентрации над поверхностью изотропного графита при разных температурах. Оказалось, что скорость сублимации углеродного волокна более чем в два раза превышает скорость сублимации графита предположительно из-за более высокого эффективного коэффициента испарения.

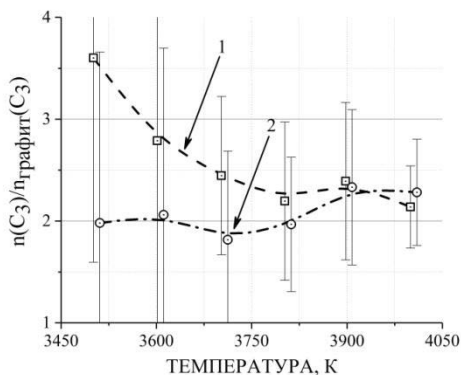


Рис. 1. Соотношение давлений молекулы C_3 над углеродным волокном и графитом МПГ-7: 1 - для поверхности вдоль волокон, 2 - для поверхности перпендикулярной направлению волокон

Следует отметить, что с ростом температуры различие в скорости испарения углеродного волокна вдоль и поперек волокон практически исчезает, однако остается заметно выше скорости испарения графита МПГ-7.

Список литературы

- [1] Drowart J. et. al.// J. Chem. Phys.. 1959. Vol. 31, № 4, p 1131-1132
- [2] Pflieger R., Sheindlin M., Colle J.-Y.// Int. J. Thermophys. 2005. Vol. 26, № 4, p 1075-1093

М.Б. ШАВЕЛКИНА, Е.И. ШКОЛЬНИКОВ, С.А. КОЧАНОВА,
Р.Х. АМИРОВ

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

СУПЕРКОНДЕНСАТОР НА ОСНОВЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ В СТРУЕ ПЛАЗМЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Разработан плазмоструйный метод синтеза графена и углеродных нанотрубок, обладающих мезопористостью и гидрофобностью. Полученные материалы введены в состав электродов для суперконденсатора. Проведены измерения по циклическому заряд/разряд постоянным током, на основе которых рассчитаны зависимости емкости и внутреннего сопротивления суперконденсатора. Установлено, что применение графена снижает сопротивление суперконденсатора по сравнению с углеродными нанотрубками,

M.B. SHAVELKINA, E.I. SHKOLNIKOV, S.A. KOCHANOVA,
R.H. AMIROV

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

SUPERCONDENSATOR BASED SYNTHESIZED IN PLASMA JETS CARBON NANOMATERIALS

A plasma jet method for the synthesis of graphene and carbon nanotubes with mesoporosity and hydrophobicity has been developed. The resulting materials are incorporated into the electrodes for the supercapacitor. Measurements were performed on cyclic charge / discharge by direct current, on the basis of which the dependences of the capacitance and internal resistance of the supercapacitor were calculated. It has been established that the use of graphene reduces the resistance of a supercapacitor compared to carbon nanotubes.

Одним из направлений повышения удельных характеристик суперконденсатора (СК) является уменьшение количества электролита в электродах. Однако просто удалить из электрода избыточное количество электролита можно лишь в небольших пределах: при избыточном удалении электролита начинает резко увеличиваться внутреннее сопротивление СК и падает емкость. Для понижения внутреннего сопротивления СК создают электронпроводящие сети в электродной массе с помощью высокодисперсных добавок. В данной работе в электродную массу добавлены мезопористый графен и углеродные нанотрубки (УНТ). Синтез наноразмерных

материалов проведен в плазмоструйном реакторе [1]. Преимущество подхода заключается в отсутствии катализаторов (примесь металлов) при синтезе и малая дефектность материала. Исследования поверхностных свойств [2] показали, что полученные в объеме продукты синтеза обладают в зависимости от рода плазмообразующего газа удельной поверхностью от 350 до 850 м²/г. По данным исследования пористости наноматериалов следует, что диапазон распределения пор в графене и УНТ различаются. Для УНТ основные пики приходятся на диапазон $r_p = 70\text{--}1100 \text{ \AA}$. Два основных пика для графена расположены в диапазоне $r_p = 200\text{--}1020 \text{ \AA}$.

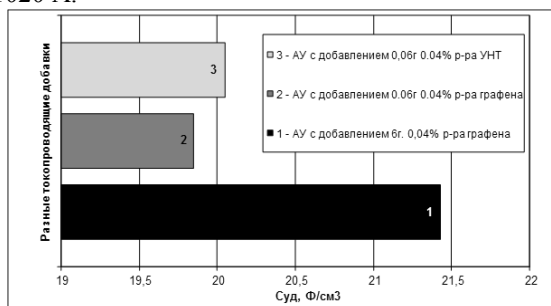


Рис. 1. Гистограмма влияния добавок УНТ и графена на емкостные характеристики СК.

На рисунке 1 представлена гистограмма влияния добавок УНТ и графена на емкостные характеристики СК. Из рисунка видно, что наибольшее значение емкости получатся при использовании большего количества графена. Для исследования емкостных характеристик СК заряжали до напряжения 2,5В и разряжали с заданными токами, а также циклировали ячейку в режиме заряд-разряд током 5,5мА/см², в диапазоне напряжения 0-2,5В и 1,25-2,5В.. Удельная (на единицу объема СК) емкость СК определялась на разряде по формуле: $C = I \cdot t / ((U_{нач} - U_{конеч}) \cdot 2 \cdot l \cdot S)$, где I – ток разряда, t – время разряда, $U_{нач}$ – начальное напряжение при разряде, $U_{конеч}$ – конечное напряжение при разряде, l – толщина электрода, S – площадь электрода. Измеренное сопротивление СК для электродов с УНТ составило 165 Ом, с графеном -100 Ом. Различие в сопротивлении мы связываем с большей чувствительностью эффективного сопротивления к реализациям пористости структур в электродах.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом РФФИ № 18-08-00040.

Список литературы

- [1] Shavelkina M B, et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. 748 012021-5.
- [2] Shkolnikov E.I., Sidorova E.V., Malakhov A.O., Volkov V.V., Julbe A., Ayral A. // Adsorption. 2011. Vol. 17. № 6. P. 911-918.

В.А. ШАХУНОВ, Г.А. ОВСЯННИКОВ, Т.А. ШАЙХУЛОВ,
А.М. ПЕТРЖИК

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ МАНГАНИТНЫХ ПЛЕНОК, ВЫРАЩЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Рассмотрены электронные транспортные свойства пленок $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LBMO), толщиной 40-100 нм, выращенных с помощью лазерной абляции на подложках $0.79\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ - 0.21PbTiO_3 (PMN-PT), которые являются сегнето-электрическими кристаллами с температурой Кюри 150С и высокими пьезоэлектрическими постоянными. Прикладывая напряжение на PMN-PT подложку, исследовалось влияние сегнетоэлектрической поляризации и пьезоэлектрического эффекта на электрические параметры LBMO пленок.

V.A. SHAKHUNOV, G.A. OVSYANNIKOV,
T.A. SHAIKHULOV, A.M. PETRZHNIK

Kotelnikov IRE RAS, Moscow, Russia

STRAIN OF EPITAXIAL MANGANITE FILMS, GROWN BY LASAR ABLATION

The electron transport properties of $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LBMO) films, 40–100 nm thick, grown by laser ablation on $0.79\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ - 0.21PbTiO_3 (PMN-PT) substrates, which are ferroelectric crystals with a Curie temperature 150C and high piezoelectric constants. By applying a voltage to the PMN-PT substrate the effect of the ferroelectric polarization and the piezoelectric effect on the electrical parameters of the LBMO films was studied.

Причиной изменения электрических и магнитных параметров эпитаксиальных пленок, выращенных на подложке, является напряжение, вызванное рассогласованием параметров решетки с подложкой. Было показано, что трехмерное сжатие кристаллической решетки манганитов увеличивает амплитуду вероятности перескока в модели двойного обмена, что ведет к увеличению температуры Кюри (T_c), в то же время двухосные искажения ян-телеровского типа вызывают усиление локализации электронов и уменьшают температуру Кюри T_c манганитов [1].

Эпитаксиальные $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LBMO) пленки толщиной 40–150 nm выращивались на подложках $0.79\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.21PbTiO_3 (PMN-PT)

с помощью лазерной абляции при температуре 600–800°C и давлении кислорода 0.2–0.5 mBar. Использовалась ориентация подложки (011) PMN-PT. Сегнетоэлектрические кристаллы PMN-PT обладает структурой типа перовскит с постоянными решетки близкой к кубу со стороной $a \approx 0.4$ nm.

Зависимость сопротивления LBMO пленки от напряженности электрического поля, приложенного по нормали к подложке (Рис.1) изменяется аналогично изменению механической деформации подложки (см. [2]), т.е. наиболее сильное изменение сопротивления пленки наблюдается в той же области электрических напряжений, что и механическая деформация.

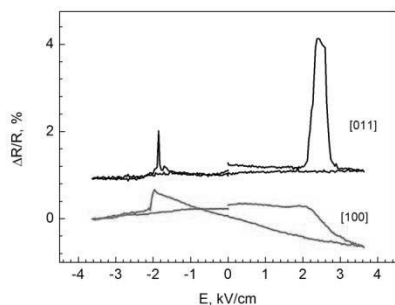


Рис.1. Зависимость изменения сопротивления LBMO пленки в двух направлениях [001] PMN-PT и [011] PMN-PT от напряженности электрического поля на подложке при T=300K.

На температурных зависимостях сопротивления всех исследованных пленок с уменьшением температуры ниже комнатной наблюдался пик сопротивления при $T=T_M$, типичный для манганитов. При низких температурах ($T < 100K$) удельное сопротивление всех LBMO пленок не выходило на асимптотическое значение, как в пленках LBMO, а продолжало расти, что указывает на сильное влияние процессов рассеяния на примесях, дефектах и границах.

Авторы благодарны А.А. Климову, В.Л. Преображенскому, N. Tiercelin, P Pernod за помощь в проведении эксперимента и полезные обсуждения. Работа частично поддерживалась проектом РФФИ 18-37-00170, а также Международной лабораторией LEMAC-LICS.

Список литературы

- [1] Millis A.J., Darling T., Miglioni A. // J. Appl. Phys. Vol.83, 1588 (1998)
- [2] Ovsyannikov G.A., Shaikhulov T.A., Shakhunov V.A., et al // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism (2019) to be published

В.С. ШУСТОВ¹, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ¹, А.Б. АНКУДИНОВ¹,
Н.М. РУБЦОВ²

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

²Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А. Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НАНОСТРУКТУРНЫМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

Были изготовлены пористые носители из порошков нержавеющей стали марки X18H10T с бимодальным распределением пор по размеру (порядка 10 мкм и порядка 200 мкм). На поверхности пор создана наноструктура из оксида алюминия, представляющая собой пленку нанометровой толщины.

V.S. SHUSTOV¹, V.A. ZELENSKY¹, A.B. ANKUDINOV¹, N.M.
RUBTSOV²

¹ - Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ² - Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

MODIFICATION OF THE POROUS SURFACE OF STAINLESS STEEL BY NANOSTRUCTURAL ALUMINUM OXIDE

Porous samples with a bimodal pore size distribution (about 10 μm and about 200 μm) from stainless steel X18H10T powders were made. Nanostructure of aluminum oxide, which is a film of nanometer thickness, on the surface of the pores is created.

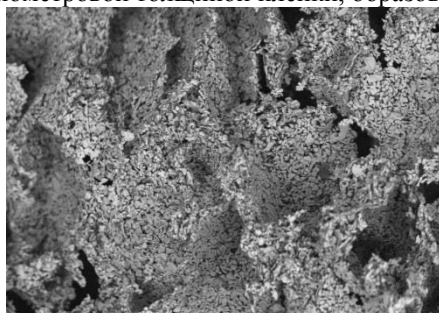
Синтез пористого материала и модификация его внутрипорового пространства проводились путем пропитки пористых носителей, изготовленных из порошка нержавеющей стали X18H10T, растворами солей с последующим их термическим разложением.

Процесс изготовления пористого образца заключался в компактировании смеси порошка нержавеющей стали (со средним размером частиц 10-20 мкм) и порообразователя (размер частиц 250-320 мкм) с приложением одностороннего давления 400 МПа. Улетучивание порообразователя и спекание при температуре 700 °С приводило к образованию пористой

структуры в материале, которая при этом характеризовалась бимодальным распределением пор по размеру. На рис.1 представлено изображение поверхности излома спечённого образца. На изображении хорошо видны крупные поры в образце, размер которых составляет примерно 200 мкм, а так же можно заметить наличие каналов, видимых как чёрные пятна. Эти каналы могут соединять поры по всему объёму образца, имея выходы в пространство разрозненных пор.

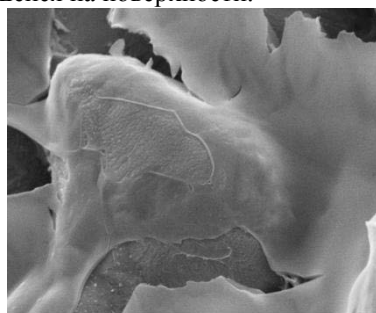
Модифицирование поверхности пористого носителя оксидом алюминия производилось путем пропитки его водным раствором соли нитрата алюминия $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Пористый образец пропитывался растворами солей разной концентрации от 0,5 до 1,5 моль/литр. В результате сушки и последующего отжига при температуре 450 °С в течение 60 минут в атмосфере проточного аргона происходило разложение оставшейся соли и гидроксида алюминия, образовавшегося в результате гидролиза, до оксида.

По результатам растровой электронной микроскопии также установлено присутствие в материале пор размером порядка 10 мкм, обусловленных размером частиц порошка нержавеющей стали. На рисунке 2 видно, как на поверхности пористого носителя образовалась структура в виде тонкой плёнки. Микрорентгеноспектральный анализ показал наличие алюминия и кислорода, при чём на поверхности частиц носителя содержание алюминия составляло меньше 1 масс.%, что может объясняться нанометровой толщиной плёнки, образовавшейся на поверхности.



100 μm

Рис.1. Микрофотография излома образца из нержавеющей стали.



1 μm

Рис.2. Микрофотография излома образца после нанесения оксида алюминия

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-03-00867.

И.В. ЩЕТИНИН¹, В.П. МЕНУШЕНКОВ¹, Р.В. СУНДЕЕВ²,
М.В. ЖЕЛЕЗНЫЙ¹, А.Г. САВЧЕНКО¹

¹ Национальный технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² Московский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ

В работе методами рентгеноструктурного анализ, мессбауэровской спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и измерения магнитных свойств исследованы фазовые превращения и свойства сплавов на основе соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{2.8}$ после интенсивной пластической деформацией кручением и отжига. Интенсивная пластическая деформация приводит к измельчению структуры, что сопровождается резким увеличением коэрцитивной силы и немономотонному ее поведению. Отжиг сплавов при температурах ниже 450°C приводит к увеличению намагниченности насыщения.

I.V. SHCHETININ¹, V.P. MENUSHENKOV¹, R.V. SUNDEEV²,
M.V. ZHELEZNYI¹, A.G. SAVCHENKO¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Russia

² Moscow Technological University, «MIREA», Moscow, Russia

STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF ALLOYS BASED ON $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ COMPOUND AFTER SEVERE PLASTIC DEFORMATION BY TORSION

The structural transformations and magnetic properties changes of alloy based on $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{2.8}$ compound after severe plastic deformation by torsion and annealing were studied with help x-ray diffraction analysis, magnetic properties measurement, scanning electron microscopy studies and Mossbauer spectroscopy. Severe plastic deformation leads to formation fine structure and increase coercive of alloys not monotonously. Annealing of alloys below 450°C increases the saturation magnetization.

Нитриды сплавов на основе соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ перспективны для разработки постоянных магнитов, так как они имеют высокую константу магнитной кристаллической анизотропии, температуру Кюри и содержат меньше редкоземельных металлов по сравнению с соединением $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. В связи с этим изучение закономерностей образования структуры и магнитных свойств нитридов $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ после интенсивной пластической де-

формации является актуальной задачей как с научной, так и с практической точки зрения.

В работе исследованы структурные превращения и магнитные свойства сплавов на основе соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{2.8}$ после интенсивной пластической деформации кручения и последующих отжигов. Нитриды соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ были получены путем многократного гидрирования-дегидрирования и последующего азотирования при 450°C в течение 40 часов. Интенсивная пластическая деформация проводилась в камере Бриджмена с давлением 6 ГПа. Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием $\text{CoK}\alpha$ излучения. Анализ спектров проводился с использованием программного обеспечения PDXL (Rigaku). Микроструктуру сплавов изучали с помощью электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH. Измерение магнитных свойств проводилось на установке PPMS (Quantum Design).

Сплавы в исходном состоянии и после процессов гидрирования, дегидрирования содержали основную фазу $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ и небольшое количество ($<2\%$) $\alpha\text{-Fe}$. Азотирование привело к увеличению периода решетки фазы $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ без образования новых фаз. После интенсивной пластической деформации дифракционные картины характеризовались сильным уширением дифрагированных линий, которые указывают на образование дисперсной структуры и подтверждаются данными СЭМ: образование равноосной структуры со средним размером зерна около 20 нм. Согласно рентгеноструктурному анализу доля $\alpha\text{-Fe}$ после интенсивной пластической деформации возросла из-за разложения фазы $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{2.8}$. Гистерезисные свойства сплавов изменялись с максимумом: при деформациях с $n = 2,5$ коэрцитивная сила увеличивалась до 6,5 кЭ, а увеличение степени деформации привело к уменьшению коэрцитивной силы. Снижение коэрцитивной силы связано с снижением доли основной магнитотвердой фазы $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{2.8}$ и выделением магнитомягкого $\alpha\text{-Fe}$. Отжиг сплавов ниже температуры 450°C приводил к незначительному снижению коэрцитивной силы и увеличению намагниченности насыщения. Отжиг при температурах выше 450°C приводил к снижению всех гистерезисных характеристик, что связано с разложением основной магнитотвердой фазы $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{2.8}$ на SmN и $\alpha\text{-Fe}$.

Работа выполнена при финансовой поддержки Российского научного фонда, соглашение № 18-72-00249.

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*

ПРОТОТИП ДЕТЕКТОРА ПАРОВ НИТРОСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ МДП-СЕНСОРА

Разработан и исследован прототип детектора нитросодержащих веществ на основе МДП-сенсора. Порог детектирования по массе тринитротолуола составляет единицы нг, время обнаружения не более 30 сек.

M.O. ETREKOVA^{1,2}, A.V. LITVINOV¹, A.A. MIKHAILOV²

¹ *National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation*

² *Scientific production company "INKRAM", Moscow, Russian Federation*

PROTOTYPE OF NITRO COMPOUNDS DETECTOR BASED ON MIS-SENSOR

A prototype detector of nitro-containing substances based on a MIS sensor was developed and tested. The detection threshold for the mass of trinitrotoluene is units of ng, the detection time is not more than 30 seconds.

В работе [1] были изучены и определены оптимальные режимы детектирования нитросоединений по газообразным продуктам их термического разложения с использованием МДП-сенсоров типа Pd-SiO₂-Si. Было показано, что метод, основанный на терморедоксе и МДП-сенсорике, позволяет достичь предела обнаружения по следовым количествам тринитротолуола (ТНТ) 1 нг (10⁻¹² г/см³).

Цель настоящего исследования – разработка и тестирование прототипа детектора нитросодержащих веществ на основе МДП-сенсора. Фотографии макетного образца детектора приведены на рис. 1.

При разработке макета детектора для измерения сигнала МДП-сенсоров были реализованы и испытаны три метода измерения емкости: амплитудный метод с делителем, амплитудный мостовой и импульсный. Оптимизированы энергопотребление и конструкция реактора (камеры пиролиза), объем газового тракта уменьшен с 40 см³ (экспериментальная установка, описанная в [1]) до 14 см³ с учетом насадки-испарителя.

Для компенсации влияния паров воды на показания МДП-сенсора и для минимизации вероятности ложных срабатываний макетного образца

детектора предусмотрен датчик температуры и влажности, показания которого в режиме реального времени используются в расчете компенсационной поправки для сигнала МДП-сенсора.

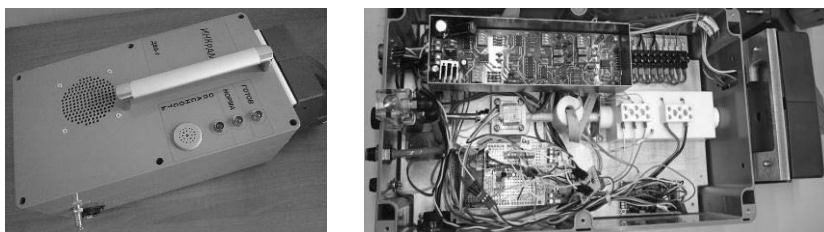


Рис.1. Внешний вид и внутреннее устройство измерительного блока прототипа детектора (габаритные размеры 530x210x200 мм ДхШхВ).

Согласно [2], определение следовых количеств веществ – задача, которая требует комплексного подхода к решению и подразумевает эффективность физического метода анализа, пробоподготовку и обработку аналитического сигнала программными средствами. Поэтому при тестировании прототипа детектора были испытаны два варианта конструкции испарителя (плоский и цилиндрический). Для уменьшения фоновых сигналов, а также его колебаний, была применена дифференциальная обработка сигнала N (рис. 2, а), что также позволило уменьшить время достижения порогового уровня сигнала при отклике на предельно обнаруживаемую массу ТНТ 2 нг до 15 сек (рис. 2, б).

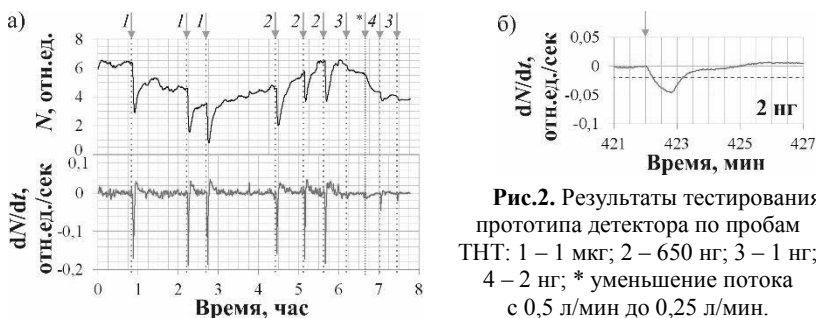


Рис.2. Результаты тестирования прототипа детектора по пробам ТНТ: 1 – 1 мкг; 2 – 650 нг; 3 – 1 нг; 4 – 2 нг; * уменьшение потока с 0,5 л/мин до 0,25 л/мин.

Список литературы

- [1] Литвинов А.В., Этрекова М.О., Михайлов А.А. Обнаружение паров нитросодержащих веществ с помощью сенсоров на основе МДП-структур, изготовленных методом лазерного напыления // IV Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» Лаплаз-2018: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. с. 113-114.
- [2] Будников Г.К. Определение следовых количеств веществ как проблема современной аналитической химии // Соросовский образовательный журнал. Т.6, № 3, 2000. С. 45-51.

А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹, В.В. ПОПОВ¹, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹,
А.И. БЕСКРОВНЫЙ², Д. НЕОВ², К.В. ПОНКРАТОВ³
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Москва,
Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ООО Ренишоу, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА РЗЭ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ПРЕКУРСОРОВ НА СТРУКТУРНЫЕ УПОРЯДОЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (Ln = La, Nd, Tb, Yb, Y)

Методами нейтронной и рентгеновской дифракции, а также спектроскопии комбинационного рассеяния выявлены особенности упорядочения катионной подрешетки и их кислородного окружения в системе $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (Ln = La, Nd, Tb, Yb, Y), а также установлена взаимосвязь влияния условий синтеза на кристаллическую и локальную структуру исследованных цирконатов РЗЭ.

A.A. YASTREBTVSEV¹, V.V. POPOV¹, A.P. MENUSHENKOV¹,
A.I. BESKROVNIY², D. NEOV², K.V. PONKRATOV³

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Renishaw plc, Moscow, Russia

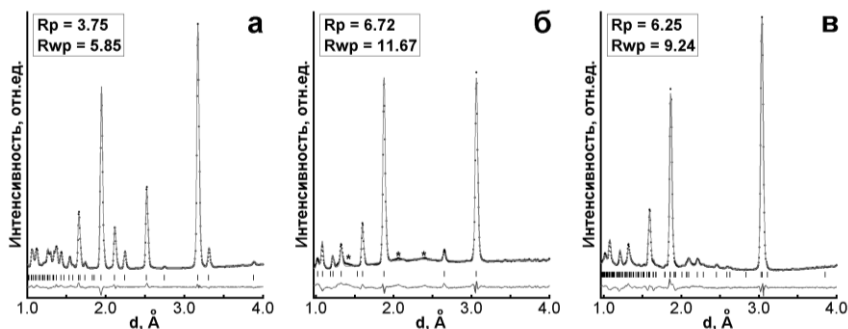
INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS AND LANTHANOIDE TYPE ON THE CRYSTAL AND LOCAL ORDERING IN NANOSTRUCTURED $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (Ln = La, Nd, Tb, Yb, Y)

The aim of the present work is investigation of the influence of the cation radii ratio ($\gamma = 1.37 - 1.61$) and temperature of the isothermal calcination on the specific features of fluorite – pyrochlore phase transition in $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (Ln = La, Nd, Tb, Yb and Y), by means of Neutron (NPD) and X-ray (XRD) diffraction as well as Raman spectroscopy.

Сложные оксиды переходных d- и f- элементов с общей формулой $\text{Ln}_2\text{M}_2\text{O}_7$ (Ln – редкоземельный элемент (РЗЭ), М – металл титановой подгруппы) благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам имеют самое разнообразное практическое применение в качестве люминоесцентных материалов, катализаторов, инертных матриц для утилизации радиоактивных отходов, теплозащитных покрытий, твердых электролитов и др. [1]. При этом, многие из этих свойств рассматриваемых систем на-

прямую зависят от упорядочения катионной и анионной подрешёток в образующейся структуре. Целью данной работы являлось изучение влияния вида катиона РЗЭ и температуры синтеза оксидов на упорядочение металлических ионов и их кислородного окружения в системе $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Y}, \text{Yb}$) с помощью методов нейтронной и рентгеновской дифракции, а также спектроскопии комбинационного рассеяния (КР).

Анализ полученных данных показал, что уменьшение радиуса катиона РЗЭ в ряду $\text{La} \rightarrow \text{Nd} \rightarrow \text{Tb} \rightarrow \text{Y} \rightarrow \text{Yb}$ слабо влияет на структурное упорядочение в исследуемой системе при низких температурах отжига прекурсоров. Напротив, при температурах синтеза выше 1200°C наблюдается переход от структуры пироклора (для La и Nd) через структуру дефектного флюорита (для Tb и Y) к ромбоэдрической δ -фазе (для иона Yb). Проведённый полнопрофильный анализ порошковых дифрактограмм по методу Ритвельда позволил определить не только параметры катионной подрешётки, но и особенности температурного поведения кислородного окружения катионов. А именно, был подтверждён ранее установленный с помощью спектроскопии КР эффект запаздывания упорядочения катионной подрешётки относительно упорядочения анионов и обнаружено дополнительное упорядочение катионной подсистемы в $\text{Yb}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$ при низких температурах отжига.



Результаты полнопрофильного анализа нейтронограмм порошков $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (а - $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, б - $\text{Tb}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ в - $\text{Yb}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$), полученных отжигом прекурсоров при температуре 1300°C . * обозначены сверхструктурные рефлексы для $\text{Tb}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-12-00133).

Список литературы

- [1] Trump B.A., Koohpayeh S. M., Livi K. J. T., et al. // Nature Comm. 2018. V. 9. 2619.

Д.С. ЯШКИН, И.В. КУЛИКОВ, В.С. КОРОТКОВ,
М.Я. ЧЕРНЫХ

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

СОЗДАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КОНТАКТА НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Разработана методика создания сверхпроводящего контакта между ВТСП-лентами. С помощью такого контакта создан замкнутый сверхпроводящий контур и исследована релаксация захваченного им магнитного потока. Измерения подтверждают наличие сверхпроводящего тока через контакт. Определенная из релаксационной кривой логарифмическая скорость релаксации согласуется с параметром крутизны нарастания вольт-амперной характеристики, определенной четырехконтактным методом.

D.S. YASHKIN, I.V. KULIKOV, V.S. KOROTKOV,
M.Y. CHERNYKH

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING JOINT ON THE BASIS OF HTS 2G TAPES

The method of fabrication superconducting joint was developed. Closed superconductive loop was made with this method. Relaxation measurement confirms existence of supercurrent flowing contact. Relaxation rate correlates with n-index obtained from 4-probe measurements.

Современные ВТСП ленты второго поколения характеризуются высоким значением токонесущей способности и хорошими механическими свойствами, поэтому такие ленты привлекательны для использования при создании устройств на основе ВТСП. В настоящее время актуальными являются разработки и исследования в области создания сверхпроводящих ВТСП магнитов, работающих при температуре жидкого азота. Магниты на основе высокотемпературных сверхпроводников, работающие от источника постоянного тока, потребляют электроэнергию в течение всего времени своей работы. Более экономичными были бы магниты, работающие в режиме замороженного магнитного потока. Одним из способов сделать такие магниты является создание сверхпроводящего контакта,

которым можно было бы замкнуть обмотку после введения в неё электрического тока с помощью источника.

Методом твердофазной диффузии получен сверхпроводящий контакт между двумя лентами, изготовленными авторами в НИЦ «Курчатовский институт» на основе подложек с буферным покрытием производства компании «СуперОкс», и измерена его вольт-амперная характеристика. Критический ток контакта по критерию 1 мкВ/см составил 18 А при ширине ленты 6 мм.

С использованием разработанной методики был сформирован замкнутый контур из ВТСП ленты шириной 6 мм и измерена релаксация захваченного магнитного потока. Образец намагничивался после охлаждения в нулевом магнитном поле, затем в течение длительного времени измерялось магнитное поле вблизи образца в направлении, перпендикулярном плоскости кольца (рис. 1).

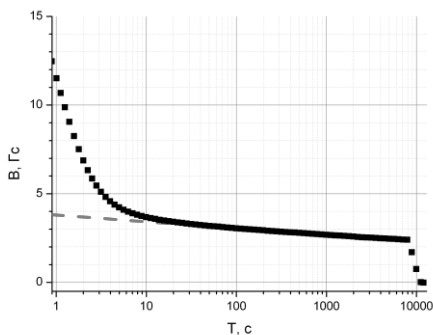


Рис. 1. График изменения магнитного поля вблизи образца с течением времени.

На рисунке показано, что на участке от 10 секунд до начала отогрева образца график близок к прямой, что соответствует логарифмическому затуханию магнитного поля. Такое поведение является характерным для тока в сверхпроводнике в режиме крипа магнитного потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-29-10023«офи_м».

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

Н.Н. АРСЕНЬЕВ¹, А.П. СЕВЕРЮХИН¹, В.В. ВОРОНОВ¹,
НГУЕН ВАН ДЖАЙ²

¹Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Дубна, Россия;

²Институт ядерной физики, Университет Париж-юг, Орсе, Франция

ПИГМИ И ГИГАНТСКИЙ ДИПОЛЬНЫЙ РЕЗОНАНСЫ В $^{48,50}\text{Ca}$ И $^{68,70}\text{Ni}$

В приближении случайных фаз с остаточным взаимодействием Скирма SLy5 изучается влияние связи между одно- и двух-фононными компонентами волновых функций на спектр дипольных возбуждений в нейтронно-избыточных изотопах кальция и никеля. Взаимодействие со сложными конфигурациями приводит к появлению силы E1 переходов в низкоэнергетической области и улучшает описание экспериментальных данных в случае ^{48}Ca . В докладе также обсуждается влияние связи между одно- и двух-фононными компонентами волновых функций на электрическую дипольную поляризацию. Мы предсказываем сильное увеличение суммарной силы E1 переходов ниже 10 МэВ (12 МэВ) в случае ядер ^{50}Ca (^{70}Ni) в отличии от ^{48}Ca (^{68}Ni).

N.N. ARSENYEV¹, A.P. SEVERYUKHIN¹, V.V. VORONOV¹,
NGUYEN VAN GIAI²

¹Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics JINR, Dubna, Russia;

²Institut de Physique Nucléaire, Université Paris-Sud, Orsay Cedex, France

PYGMY AND GIANT DIPOLE RESONANCES IN $^{48,50}\text{Ca}$ AND $^{68,70}\text{Ni}$

Starting from the quasiparticle random phase approximation based on the Skyrme interaction SLy5, we study the effects of phonon-phonon coupling (PPC) on the E1 strength distributions of neutron-rich calcium and nickel isotopes. Using the same set of parameters, we describe available experimental data for ^{48}Ca , ^{68}Ni and give prediction for ^{50}Ca , ^{70}Ni . The inclusion of the PPC results in the formation of low-energy 1^- states of ^{48}Ca . There is an impact of the PPC effect on low-energy E1 strength of ^{48}Ca . The effect of the low-energy E1 strength on the electric dipole polarizability is discussed. We predict a strong increase of the summed E1 strength below 10 MeV (12 MeV), with increasing neutron number from ^{48}Ca (^{68}Ni) till ^{50}Ca (^{70}Ni).

Новые экспериментальные установки (DRIBs в ОИЯИ г. Дубна или FAIR в Институте тяжелых ионов г. Дармштадт) существенно расширяют возможности синтеза ядер, удаленных от границ ядерной стабильности, и способствуют изучению короткоживущих ядер в лабораторных условиях.

Такие ядра обладают экзотическими свойствами, которых нет у стабильных ядер, как например, нейтронное и протонное гало, пигми-резонанс и другие [1]. Физика ядер с сильной нейтронно-протонной асимметрией оказывается связанной с широким кругом интересных задач, среди которых предсказание эволюции структуры ядра при изменении соотношения между числом протонов и нейтронов, что особенно важно для астрофизических приложений, в частности, для изучения связи ядерных процессов с нуклеосинтезом элементов, сопровождающим коллапс массивных звезд. Для современной экспериментальной и теоретической ядерной физики свойства ядерных возбуждений вблизи магических ядер (^{48}Ca и ^{68}Ni) важны для решения проблемы описания g -процесса. С другой стороны, получаемые новые экспериментальные данные, в частности распределение дипольной силы в низкоэнергетической области, требуют теоретической интерпретации и развития соответствующих теоретических подходов.

Одним из основных подходов описания ядерных возбуждений является квазичастичное приближение случайных фаз (ПСФ) с эффективными силами Скирма [2]. Такие расчеты не требуют введения новых параметров, так как остаточное взаимодействие получено самосогласованным образом с тем же самым функционалом плотности энергии, как и среднее поле. Изучение распределения дипольной силы в низкоэнергетической области, требует учета связи простых частично-дырочных конфигураций с более сложными (двух-фоонными) конфигурациями [3]. Это делает необходимым расчет в большом конфигурационном пространстве. Сепарабельзация остаточного взаимодействия Скирма позволяет обойти эту трудность и проводить вычисления независимо от конфигурационного пространства [4].

В данном докладе мы применяем этот подход для описания свойств пигми и гигантского дипольного резонансов в $^{48,50}\text{Ca}$ [5] и $^{68,70}\text{Ni}$ [6]. При этом мы анализируем влияние связи между одно- и двух-фоонными компонентами волновых функций на спектр дипольных возбуждений, уделяя особое внимание свойствам пигми-резонанса.

Список литературы

1. Savran D., Aumann T., Zilges A. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2013. Vol. 70. P. 210–245.
2. Paar N., Vretenar D., Khan E., Colò G. // Rep. Prog. Phys. 2007. Vol. 70. P. 691–793.
3. Soloviev V.G. Theory of Atomic Nuclei: Quasiparticles and Phonons. 1992. Bristol/Philadelphia.
4. Giai N.V., Stoyanov Ch., Voronov V.V. // Phys. Rev. C. 1998. Vol. 57. P. 1204–1209.
5. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P., Voronov V.V., Giai N.V. // Phys. Rev. C. 2017. Vol. 95. P. 054312.
6. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P., Voronov V.V., Giai N.V. // in preparation.

М.Е. БОРИСОВ¹, Д.Н. ВОСКРЕСЕНСКИЙ^{2,3}, Е.Э.
КОЛОМЕЙЦЕВ^{3,4}

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Лаборатория теоретической физики им. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна, Россия

⁴Университет Матея Бела, Банска Быстрица, Словакия

ФЛУКТУАЦИИ ЧИСЛА ЧАСТИЦ И ЗАРЯДА В СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕМ НАГРЕТОМ ПИОННОМ ГАЗЕ

Изучены флуктуации числа частиц и заряда в сильно-взаимодействующем нагретом пионном газе с динамически фиксированным числом частиц, который может быть сформирован в столкновениях тяжёлых ионов при ультрарелятивистских энергиях. В самосогласованном приближении Хартри получены выражения для дисперсии числа частиц разных сортов. Анализируется поведение флуктуаций числа пионов разного сорта при температуре близкой к критической температуре Бозе-Эйнштейновской конденсации T_c . Нормированная дисперсия полного числа частиц $N = N_{\pi^+} + N_{\pi^-} + N_{\pi^0}$ в симметричной относительно всех сортов частиц среде оказывается конечной при $T = T_c$, а заряда $Q = N_{\pi^+} - N_{\pi^-}$ - расходится.

М.Е. BORISOV¹, D.N. VOSKRESENSKY^{2,3}, E.E. KOLOMEITSEV^{3,4}

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

²National Research Nuclear University (MEPhI), 115409 Moscow, Russia

³Bogoliubov Laboratory for Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, RU-141980 Dubna, Russia

⁴Matej Bel University, SK-97401 Banska Bystrica, Slovakia

PARTICLE AND CHARGE NUMBER FLUCTUATIONS IN STRONGLY INTERACTING HEATED PION GAS

We study fluctuations of the particle number and charge in strongly interacting pion gas with dynamically fixed number of particles, which might be formed in heavy-ion collisions at ultra-relativistic energies. Expressions for the cross-covariances of the number of various particle species are derived within the self-consistent Hartree approximation. We analyze behavior of particle fluctuations at temperatures approaching the critical temperature of the Bose-Einstein condensation T_c . While the scaled variance of the total particle number $N = N_{\pi^+} + N_{\pi^-} + N_{\pi^0}$ in a symmetrical system with respect to all sorts of particles proves to be finite at T_c , scaled variance of the charge, $Q = N_{\pi^+} - N_{\pi^-}$, diverges.

В экспериментах по столкновению тяжёлых ионов при ультрарелятивистских энергиях, осуществляемых на установках RHIC и LHC, рождается более тысячи пионов. Их множественность N_π превышает на порядок множественность нуклонов N_N . Пионы образуют горячий пионный фajerбол, а барионы пролетают – модель Бьёркена. Затем пионный фajerбол расширяется в с.ц.м. и охлаждается. Оценки показывают, что неупругие процессы подавлены на временах жизни системы вплоть до стадии развала фajerбола, когда прекращаются столкновения и импульсные распределения частиц замораживаются. В пионном же газе с динамически фиксированным числом частиц при температуре ниже критической, T_c , может возникнуть вынужденная Бозе-Эйнштейновская конденсация пионов [1]. Фитирование экспериментальных данных [2] для симметричной среды, со средними числами частиц $\langle N_{\pi^+} \rangle = \langle N_{\pi^-} \rangle = \langle N_{\pi^0} \rangle = \frac{\langle N \rangle}{3}$, указывает на близость системы в момент ее развала к критической точке Бозе-Эйнштейновской конденсации для идеального газа пионов. Оценённое значение обратного наклона распределения пионов (температура) в момент развала фajerбола $T_{th} \approx 138$ МэВ, химический потенциал $\mu_{th} \approx 134.9$ МэВ, плотность $n \approx 2.6 n_0$, где $n_0 = 0.16$ фм⁻³ – плотность атомного ядра.

В реальности пионный газ – система с сильным взаимодействием. Следуя [3], мы рассматриваем пионный газ со взаимодействием типа $H_{int} = \frac{\lambda \varphi^4}{4}$ в самосогласованном приближении Хартри. В модели большого канонического ансамбля нами вычислены нормированная дисперсия числа частиц каждого сорта и заряда для среды произвольного состава и в частном случае симметричной среды. Для среды, в которой среднее число частиц одного сорта больше других, нами показано, что в критической точке Бозе-Эйнштейновской конденсации (в этом случае она определяется по распределению того сорта частиц, среднее число которых больше других) величины нормированной дисперсии w_{ab} для всех сортов a, b оказываются конечными. Как следствие, дисперсия заряда также является конечной. Для симметричной среды, в критической точке Бозе-Эйнштейновской конденсации пионов дисперсия полного числа частиц оказывается конечной. Дисперсия заряда расходится при $T = T_c$. В среде с одним сортом частиц, дисперсия числа частиц оказывается конечной в критической точке.

Список литературы

1. D.N. Voskresensky, JETP. 78, 793 (1994).
2. V. Begun, W. Florkowski, and M. Rybczynski, Phys. Rev. C 90054912 (2014).
3. E. E. Kolomeitsev and D. N. Voskresensky, Nucl. Phys. A 973, 89 (2018).

М.Л. ГОРЕЛИК¹, Б. А. ТУЛУПОВ², М. Г. УРИН³

¹Московская экономическая школа, Москва, Россия

²Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

³Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия

СВОЙСТВА ИЗОСКАЛЯРНЫХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ ГИГАНТСКИХ РЕЗОНАНСОВ В РАМКАХ ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Обладающая рядом уникальных возможностей полумикроскопическая частично-дырочная дисперсионная оптическая модель использована для описанию основных свойств изоскалярных мультипольных ($L \leq 3$) гигантских резонансов в средне-тяжелых сферических ядрах. Помимо энергии к указанным свойствам относятся проектированные переходные плотности, силовые функции и вероятности прямого однонуклонного распада. Предложенное описание реализовано для ядра ^{208}Pb .

M.L. GORELIK¹, B.A. TULUPOV², M.H. URIN³

¹Moscow Economic School, Moscow, Russia

²Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia

³National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

PROPERTIES OF ISOSCALAR GIANT MULTIPOLE RESONANCES WITHIN A SEMIMICROSCOPIC MODEL

The semimicroscopic particle-hole dispersive optical model, having a few unique abilities, is used to describe main properties of isoscalar giant multipole ($L \leq 3$) resonances in medium-heavy spherical nuclei. Besides the energy, main properties include the projected transition density, strength function and probabilities of direct one-nucleon decay. The proposed description is realized for the ^{208}Pb nucleus.

Постоянный интерес к экспериментальными теоретически исследованиям изоскалярных мультипольных гигантских резонансов (ИСМПР), отвечающих компрессионным модам ядерных возбуждений, объясняется возможностью получить информацию о сжимаемости ядерной материи. В представленной работе мы используем обладающую рядом уникальных возможностей частично-дырочную дисперсионную оптическую модель для описания основных свойств ИСМПР ($L \leq 3$) в средне-тяжелых сферических ядрах. Помимо энергии, к основным свойствам ИСМПР относятся усредненные по энергии двойная и проектированная однократная переходные плотности, силовая функция и

вероятность прямого однонуклонного распада, определенные для произвольного энергетического интервала. В применении к изоскалярному монопольному гигантскому резонансу в ядре ^{208}Pb такая программа реализована в [1]. Представленная работа стимулирована возможностью использовать найденные проектированные переходные плотности в существующих компьютерных кодах для расчета сечений неупругого рассеяния α – частиц с возбуждением ИСМПГР. До настоящего времени в анализе указанных сечений используются, как правило, квазиклассические переходные плотности (см., например, [2]). В работе в качестве примера предложенное описание основных свойств ИСМПГР ($L \leq 3$) реализовано для ядра ^{208}Pb . Результаты расчетов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 19-02-0060).

Список литературы

1. M. L. Gorelik et al, Nucl. Phys. A 2016, V. 955, P. 116; 2018, V. 970, P. 353.
2. D. H. Youngblood et al, Phys. Rev. C 2013, V. 88, P. 021301

А.М. ГРУДИНИНА, Н.С. ВОРОНОВА, Ю.Е. ЛОЗОВИК
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСИТОНА С АНИЗОТРОПНОЙ МАССОЙ

Описан экситон с эффективной анизотропной массой в двумерных кристаллах с некубической решеткой. Рассмотрено описание взаимодействия зарядов при помощи кулоновского потенциала и потенциала Келдыша в приближении Кудатцо. Вариационным методом Ритца получены зависимости энергии основного состояния и профиля волновой функции от коэффициента анизотропии.

A.M. GRUDINUNA, N.S. VORONOVA, YU.E. LOZOVIK
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

GROUND STATE OF AN EXCITON WITH ANISOTROPIC EFFECTIVE MASS

We consider excitons with anisotropic effective mass in two-dimensional crystals with non-cubic lattice, describing the electron-hole interaction by both Coulomb and Keldysh potentials in Cudazzo approximation. Ground-state energy and wavefunction profiles depending on the anisotropy factor were obtained by variational Ritz method.

Экситон – это связанное состояние электрона (e) и дырки (h) в полупроводнике [1]. Эффективная масса экситона определяется как $1/m_{ex} = 1/m_e + 1/m_h$, где m_e и m_h – эффективные массы электрона и дырки, определяемые формой зоны проводимости и валентной зоны, соответственно. В материалах некубической решеткой зонная структура может зависеть от направления, что, в свою очередь, приведет к появлению анизотропии в эффективной массе квазичастиц. Данная работа посвящена исследованию эффектов указанной анизотропии для двумерных экситонов в атомарно-тонких слоях полупроводника (графен, фосфорен и др. [3-4]).

Стационарное уравнение Шредингера для двумерного экситона с анизотропной массой имеет вид:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m_x^e} \frac{\partial^2}{\partial x_e^2} - \frac{\hbar^2}{2m_y^e} \frac{\partial^2}{\partial y_e^2} - \frac{\hbar^2}{2m_x^h} \frac{\partial^2}{\partial x_h^2} - \frac{\hbar^2}{2m_y^h} \frac{\partial^2}{\partial y_h^2} + U(\mathbf{r}_e, \mathbf{r}_h) \right\} \Psi = E\Psi, \quad (1)$$

где $m_{x(y)}^{e(h)}$ – эффективная масса электрона (дырки) в направлении оси Ох (Оу), $U(\mathbf{r}_e, \mathbf{r}_h) = -e^2/\epsilon|\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_h|$ – кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой. Последовательными заменами уравнение (1) сводится к уравнению для относительного движения электрона и дырки. Поиск минимума функционала энергии осуществлялся вариационным методом Ритца с пробными волновыми функциями двух видов:

$$(a) \Psi^{(a)} = \sqrt{\frac{2\beta\lambda}{\pi}} e^{-\beta(x^2 + \lambda^2 y^2)}, \quad (b) \Psi^{(b)} = \sqrt{\frac{2\lambda\beta^2}{\pi}} e^{-\beta\sqrt{x^2 + \lambda^2 y^2}},$$

где β – вариационный параметр, λ – коэффициент анизотропии, определяемый отношение эффективных масс в направлениях x и y , который является управляющим параметром задачи. Аналитически получены зависимости энергии основного состояния от параметра анизотропии и профили волновых функций для обоих случаев.

В бесконечно тонких пленках, в силу геометрии, взаимодействие между электроном и дыркой описывается потенциалом Келдыша [4]:

$$U_{\text{Keldysh}}(x, y) = -\frac{e^2}{4\alpha} \left(H_0\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) - Y_0\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \right), \quad (2)$$

где α – поляризуемость, $\rho_0 = 2\pi\alpha$ – длина экранирования, $\rho = \sqrt{x^2 + \lambda^2 y^2}$; $H_0(x)$ – функция Струве, $Y_0(x)$ – функция Неймана. Был рассмотрен келдышевский потенциал в приближении Кудатццо [5]:

$$U_{\text{Cudazzo}}(x, y) = -\frac{e^2}{4\alpha\pi} \left\{ \ln \frac{\rho}{\rho + \rho_0} + (\gamma - \ln 2) e^{-\frac{\rho}{\rho_0}} \right\}, \quad (3)$$

где γ – константа Эйлера. Уравнение численно решалось численно вариационным методом Ритца с пробными волновыми функциями прежнего вида; получены зависимости энергии основного состояния от λ и профили волновых функций.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 18-32-20180 мол_а_дк.

Список литературы

1. R.S. Knox, *Theory of excitons*. New York: Academic (1963).
2. A.S. Rodin, A. Carvalho, A. H. Castro Neto, Phys. Rev. B **90**, 075429 (2014).
3. E. Prada, J.V. Alvarez, K.L. Narasimha-Acharya et al., Phys. Rev. B **91**, 245421 (2015).
4. L.V. Keldysh, Письма в ЖЭТФ **29**, 658 (1979).
5. P. Cudazzo, I.V. Tokatly, A. Rubio, Phys. Rev. B **84**, 085406 (2011).

Е.О. ДМИТРИЕВ¹, Ф.А. КОРНЕЕВ¹, Р. НЮТЕР²,
В. ТИХОНЧУК²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Университет Бордо, Франция

ОБМЕН УГЛОВЫМ ОРБИТАЛЬНЫМ МОМЕНТОМ МЕЖДУ ВОЛНОЙ И ЧАСТИЦЕЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

При взаимодействии лазерного импульса с орбитальным угловым моментом с разреженной плазмой в численном моделировании наблюдается генерация магнитного поля, направленного вдоль направления распространения лазерного импульса. Такое поле обусловлено азимутальным движением заряженных частиц после воздействия импульса и свидетельствует о передаче орбитального углового момента от волны к частицам. В работе рассматривается механизм данного взаимодействия.

E. DMITRIEV¹, Ph. KORNEEV¹, R. NUTER²,
V. TIKHONCHUK²

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Bordeaux University, France

ANGULAR ORBITAL MOMENTUM EXCHANGE BETWEEN WAVE AND PARTICLE IN LASER PLASMA

In numerical simulations, during the interaction of a laser pulse carrying an orbital angular momentum with dilute plasma, magnetic field generation is observed. The orientation of the magnetic field coincides with the propagation direction of the laser pulse, which means that it originates from the rotation of charged particles in plasma after the interaction with the pulse due to an angular momentum transfer. In this work, we consider possible mechanisms of this interaction.

Структурированные в пространстве лазерные пучки в параксиальном приближении хорошо описываются с помощью разложения по полному базису мод Гаусса-Лагерра; при этом различные собственные числа в данном базисе соответствуют орбитальному угловому моменту пучка. Взаимодействие таких пучков с разреженной плазмой, то есть при незначительном вкладе коллективных эффектов, можно рассматривать, как процесс взаимодействия волны с индивидуальными зарядами. При таком взаимодействии, в силу нарушения условий теоремы Лоусона-Вудварда, заряд может приобрести импульс или угловой момент. Угловой

момент заряженных частиц приводит к ненулевому суммарному магнитному полю в плазме. Генерация магнитного поля при воздействии сильно сфокусированного радиально-поляризованного лазерного импульса с орбитальным моментом была подтверждена численными расчётами [1], см. Рис. 1.

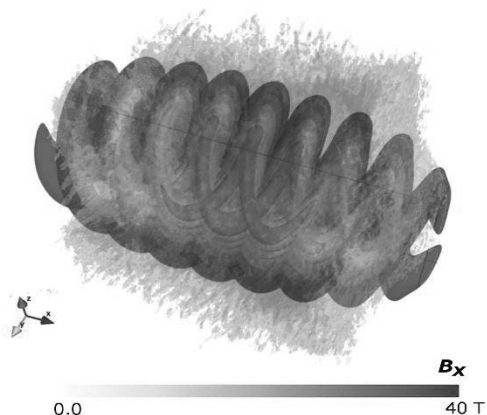


Рис.1. Интенсивность лазерного импульса с орбитальным угловым моментом и амплитуда магнитного поля в плазме при распространении такого импульса. Амплитуда магнитного поля соответствует цветовой шкале и достигает значения в 40 Тесла.

Численный расчёт позволяет получить решение уравнений Максвелла без использования параксиального приближения, но сами поля при этом не могут быть записаны аналитически. С помощью простой модели, основанной на использовании аналитических выражений для полей, качественно отвечающих численным результатам, удаётся описать процесс взаимодействия во втором порядке теории возмущений по амплитуде поля. Однако, при использовании базиса Гаусса-Лагерра аналитическое описание оказывается более сложным и требует более последовательного описания сильно сфокусированных пучков.

Список литературы

1. Nuter, R., Korneev, P., Thiele, I. and Tikhonchuk, V. (2018), Physical Review E, 98(3), 033211.

Г.В. КОЛОМИЙЦЕВ, М.Г. УРИН
*Национальный Исследовательский Ядерный Университет “МИФИ” — Москва,
Россия*

РЕЛАКСАЦИЯ ГИГАНТСКИХ РЕЗОНАНСОВ В СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ С РАЗВИТЫМ СПАРИВАНИЕМ НУКЛОНОВ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Предложенная ранее для совместного описания основных мод релаксации многообразия гигантских резонансов в магических ядрах полумикроскопическая частично-дырочная дисперсионная оптическая модель обобщена на случай развитого спаривания нуклонов в сферических ядрах с незаполненными оболочками. Полученные в “высоко-энергетическом пределе” базовые уравнения обобщенной модели реализованы на примере описания зарядово-обменных гигантских монопольных резонансов в материнском ядре ^{118}Sn .

G.V. KOLOMIYTSYEV, M.H. URIN
*National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics
Institute) — Moscow, Russia*

DAMPING OF GIANT RESONANCES IN SPHERICAL NUCLEI HAVING STRONG NUCLEON PAIRING: A SEMI- MICROSCOPIC MODEL

The semi-microscopic particle-hole dispersive optical model, proposed recently to describe together the main damping modes of various giant resonances in closed-shell nuclei, is extended to take into account strong nucleon pairing in open-shell spherical nuclei. Being derived in the “high-energy limit”, the basic equations of the extended model are used to describe the charge-exchange giant monopole resonances in the ^{118}Sn parent nucleus.

Обладающая рядом уникальных возможностей в описании основных свойств гигантских резонансов частично-дырочная дисперсионная оптическая модель (ЧДДОМ) сформулирована [1] и на ряде примеров реализована [2-4] для ядер с замкнутыми оболочками. В рамках ЧДДОМ учитываются основные моды релаксации гигантских резонансов: затухание Ландау, связь с одночастичным континуумом и многоквaziчастичными конфигурациями. К упомянутым возможностям модели относится описание усредненных по энергии различных силовых функций, а также вероятностей прямого одноклонного распада

частично-дырочных возбуждений при произвольной (но достаточно большой) энергии. В представленной работе предложена версия ЧДДОМ, в которой приближенно учитывается развитое спаривание нуклонов в сферических ядрах с незаполненными оболочками. Поскольку в рамках ЧДДОМ рассматриваются энергии возбуждения ($\sim 10\div 40$ МэВ), существенно превосходящие величину удвоенной спаривательной щели, спаривание можно учесть в терминах только частично-дырочной компоненты 4×4 матрицы свободного двухквaziчастичного пропагатора. На основе уравнений типа Бете-Голдстоуна приближенное выражение для указанной компоненты позволяет получить соответствующие дискретную и континуумные версии как квазичастичного приближения случайной фазы, так и ЧДДОМ. В работе новая континуумная версия ЧДДОМ реализована на примере описания основных свойств зарядово-обменных монопольных гигантских резонансов (включая изобарический аналоговый резонанс) в материнском ядре ^{118}Sn . Проведенное исследование является непосредственным обобщением выполненного в [4, 5] анализа свойств указанных резонансов в материнском ядре ^{208}Pb .

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-02-0060).

Список литературы

1. Urin M. H. // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 044330.
2. Tulupov B. A. and Urin M. H. // Phys. Rev.C. 2014. V. 90. P. 034613.
3. Gorelik M. L., et al. // Nucl. Phys. A. 2016. V. 955. P. 116.
4. Kolomiytsev G.V., Gorelik M.L., Urin M.H. // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 228.
5. Kolomiytsev G.V., Gorelik M.L., Urin M.H. // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 194. P. 02010.

К.С. КРЫЛОВ, В.Д. МУР, А.М. ФЕДотов

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

О СВОЙСТВАХ УРАВНЕНИЯ ДИРАКА В СИЛЬНОМ КОРОТКОДЕЙСТВУЮЩЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В модели глубокой сферически-симметричной прямоугольной ямы показано, что резонансное рассеяние частиц, возможное вблизи как нижнего, так и верхнего континуумов решений уравнения Дирака, не может служить свидетельством в пользу процесса спонтанного рождения электрон-позитронных пар в закритической области.

ON PROPERTIES OF THE DIRAC EQUATION IN A STRONG SHORT-RANGE ELECTROSTATIC FIELD

In the model of a deep spherically symmetric rectangular well, it is shown that resonant scattering of particles, possible near both the lower and upper continua of solutions of the Dirac equation, cannot serve as evidence in favor of the process of spontaneous production of electron-positron pairs in the supercritical region.

Вопрос о применимости одночастичного подхода к релятивистским волновым уравнениям в сильном электростатическом поле, убывающем на бесконечности, был, по-видимому, впервые поставлен в работе [1]. Следуя ей, мы рассматриваем свойства решений уравнения Дирака в простейшей модели сферической прямоугольной ямы. Для потенциала

$$V(\rho) = -\theta(R - \rho)V, \quad \rho = r/l_C, \quad l_C = \hbar/mc,$$

где $\theta(x)$ — ступенчатая функция, радиальное уравнение Дирака решается в функциях Бесселя, см. монографию [2], где эта задача подробно рассмотрена для любых значений дираковского квантового числа κ . Здесь ρ — безразмерный радиус, а глубина ямы V измеряется в единицах mc^2 .

Электронные уровни в такой яме достигают границы нижнего континуума решений уравнения Дирака при критическом значении глубины ямы [3] V_c . В монографии [2], также, как и в [1], отмечается, что трудность интерпретации возникает, когда $V > V_c$. По аналогии с работами [3,4] утверждается, что эта трудность связана с образованием полей при $V > V_c$ электрон-позитронных пар, так что «теория этого явления выходит за рамки одночастичного уравнения Дирака». Этой же точки зрения в релятивистской кулоновской задаче с зарядом ядра $Z > Z_{cr}$ [3] придерживаются и авторы работы [5], полагая, что брейт-вигнеровские резонансы в рассеянии позитронов являются признаком процесса рождения e^+e^- -пар.

Однако, в случае узкой ямы, $R \ll 1$, дискретные уровни хорошо отделены друг от друга во всей области энергий, $-1 \leq \varepsilon \leq 1$, $\varepsilon = E/mc^2$, и можно проследить за движением полюсов матрицы рассеяния $S_\kappa = \exp[2i\delta_\kappa(k)]$ в комплексной плоскости волнового вектора $k = (\varepsilon^2 - 1)^{1/2}$.

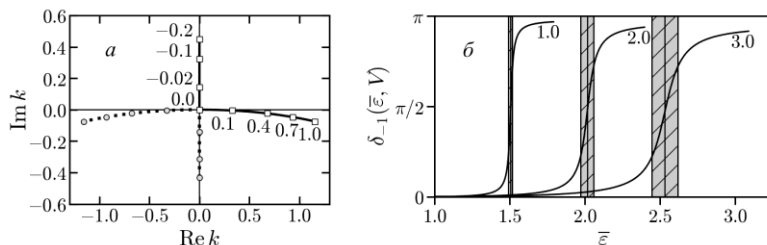


Рис. 1. Движение полюсов S -матрицы в комплексной k -плоскости (а) и фаза рассеяния как функция $\varepsilon = -\varepsilon$ (δ) s -состояний возле границы нижнего континуума. Числа указывают значения $V - V_c$. а) $R = 1/5$. Сплошная линия отвечает брейт-вигнеровскому полюсу, пунктирная — виртуальному. б) $R = 1/20$. Заштрихованная область показывает положение и ширину брейт-вигнеровских резонансов.

Так, при $V > V_c$ для основного s -состояния, отвечающего значению $\kappa = -1$, вблизи границы нижнего континуума имеем:

$$\pm = \pm' - i'', \quad \pm' = \pm(1 + R/4\pi)(V - V_c)^{1/2}, \quad '' = R(V - V_c)/4,$$

см. также Рис. 1а. Ближайший к физической области полюс $+$ задаёт брейт-вигнеровский уровень с комплексной энергией

$$\varepsilon_{BW} = -\varepsilon_0 + i/2, \quad \varepsilon_0 = 1 + (1 + R/2\pi)(V - V_c)/2, \quad = R(V - V_c)^{3/2}/2,$$

отвечающий квазистационарному состоянию позитрона с энергией $\varepsilon_{qs} = -\varepsilon_{BW} = \varepsilon_0 - i/2$, $\varepsilon_0 > 1$, > 0 . При малой надкритичности это состояние проявляется как брейт-вигнеровский резонанс с положением ε_0 и шириной

в упругом рассеянии позитрона, который отвечает кинку в фазе $\delta_{-1}(k)$, см. Рис. 1б. Аналогичные резонансы для электронов возникают в верхнем континууме при малой недосвязанности.

Важно, что парциальная фаза упругого рассеяния $\delta_{\kappa}(k)$ вещественна, что обеспечивает унитарность S -матрицы и, следовательно, отсутствие неупругих процессов, в т.ч. спонтанного рождения e^+e^- -пар.

Список литературы

1. Schiff L.I., Snyder H., Weinberg J.//Phys. Rev. 1940. Vol. 57, P. 315–318.
2. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. *Квантовая электродинамика*. Москва: Наука, 1981.
3. Pomeranchuk I., Smorodinsky Ya.// J. Phys. USSR 1945. Vol. 9, P. 97–100.
4. Зельдович Я.Б., Попов В.С.//УФН 1971. Т. 105, С. 403–440.
5. Godunov S.I., Machet B., Vysotsky M.I.//Eur. Phys. J. C 2017. Vol. 77, P. 782.

Т.А. ЛОМОНОСОВА

Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ

О РОЖДЕНИИ И КАСКАДНЫХ РАСПАДАХ ТЯЖЁЛЫХ НЕСТАНДАРТНЫХ ХИГГСОВСКИХ БОЗОНОВ

В расширенных хиггсовских секторах, за пределами стандартной модели, тяжелые хиггсовские бозоны H^0 могут распадаться через каскады на легкий хиггсовский бозон h^0 и W и Z бозоны. Рождение тяжелого бозона H^0 сопровождается последующими распадами $H^0 \rightarrow H^+ W^-$ (или $H^0 \rightarrow H^- W^+$) с $H^\pm \rightarrow W^\pm h^0$. Конечные состояния с резонансной структурой можно использовать для отличия данного процесса от фоновых процессов.

T. A. LOMONOSOVA

National Research Nuclear University MEPhI

ABOUT BIRTH AND CASCADE DECAYS OF HEAVYLY NON- STANDARD HIGGS BOSONS

In extended Higgs sectors beyond SM heavy Higgs bosons can decay via cascades to a light Higgs boson h^0 plus W and Z bosons. Production of heavy boson H^0 is followed by the decay $H^0 \rightarrow H^\pm W^\mp$ (or $H^0 \rightarrow H^\mp W^\pm$) with $H^\pm \rightarrow W^\pm h^0$. The final state with resonant structure can be used to distinguish this process from background processes.

Открытие в 2012 году на Большом адронном коллайдере (LHC) легкого узкого резонанса, бозона Хиггса, не только подтвердило механизм Хиггса как ключевую составляющую стандартной модели (SM), но также обеспечило новое мощное средство тестирования структуры стандартной модели. Возникает очевидный вопрос, включает ли этот фундаментальный скалярный сектор единственный бозон Хиггса, предсказанный в стандартной модели. Будущие e^+e^- -коллайдеры (фабрики по созданию хиггсовских бозонов) смогут измерить свойства бозонов Хиггса с высокой степенью точности, в том числе бозонов Хиггса расширенного сектора, лежащего за пределами стандартной модели.

Открытое на LHC состояние бозона Хиггса обладает свойствами поля изоспинового дублета. Такая структура допускает много новых физических сценариев, но один из наиболее важных и простых примеров состоит в дублетной модели 2 хиггсовских бозонов (2HDMs), хотя возможным решением проблемы иерархий является предположение, что

открытый бозон Хиггса и его компаньоны представляют сложные, композитные частицы, т.е. не являются элементарными.

Тем не менее, в данной работе используется модель расширенного хиггсовского сектора с минимальным числом H -бозонов, содержащая два нейтральных бозона Хиггса, тяжелый H^0 и легкий h^0 , а также два заряженных бозона Хиггса H^+ и H^- .

Рассматривается один из основных механизмов рождения бозона Хиггса на e^+e^- -коллайдере – испускание H^0 -бозона слабым нейтральным калибровочным бозоном Z , образованным в e^+e^- -аннигиляции $e^+e^- \rightarrow ZH^0$, с последующим каскадом распадов тяжелого хиггсовского бозона H^0 по каналу $H^0 \rightarrow H^+W^-$, и, в свою очередь, заряженного бозона H^+ по каналу $H^+ \rightarrow W^+h^0$. Измеряются сигналы стабильных лептонов от распадов W^- и W^+ . Получены энергетические распределения лептонов от распадов калибровочных W^- и W^+ бозонов. Расчеты выполнялись в предположении о практически квазисвободных распадах тяжелых хиггсовских бозонов, имея в виду, что их ширины $\Gamma \ll M_H$.

Характерной особенностью спектра первого каскада является изменение формы кривой с ростом массы M_H тяжелого бозона Хиггса – от кривой с ярко выраженным максимумом до формы с образованием плато. Для второго каскада положение максимума спектра смещается в сторону меньших значений с ростом энергии e^+e^- -пучков, кроме того, с ростом массы M_H кривые становятся более плоскими.

Наличие выраженных особенностей спектров лептонов первого и второго каскада может оказаться полезным для идентификации рождения бозонов Хиггса расширенного сектора, а также для отделения этих процессов от фоновых, например, от рождения $t \bar{t}$ -пар.

Список литературы

1. S. Dittmaier et al. Report of LHC Working Group. arXiv:1201.3084. [hep-ph] 15 Jan. (2012).
2. Handbook of LHC Higgs Cross Sections. CERN (2012).
3. J. Gunion et.al., “The Higgs Hunter’s Guide”, Addison-Wesley, Redwood City (1990).

Т.В. МАКСИМОВ¹, И.Л. КУРБАКОВ², Ю.Е.ЛОЗОВИК^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт спектроскопии РАН, Троицк, Россия

БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИЯ ФОТОНОВ В РЕЗОНАТОРЕ С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

Рассмотрен слабокоррелированный электронный газ в (квази-)двумерном слое, помещенном в оптический микрорезонатор в качестве активной среды, взаимодействующей с фотонами. Получена поправка к спектру электронного газа из-за экранированного кулоновского взаимодействия в приближении Хартри-Фока. Проведены оценки поправок к спектру из-за обмена фотонами и модификации электрон-фотонных вершин кулоновским взаимодействием.

T.V. MAXIMOV¹, I.L.KURBAKOV², YU. E. LOZOVIK^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

²Institute for Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia

BOSE CONDENSATION OF PHOTONS IN THE CAVITY IN THE PRESENCE OF TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS

Weakly correlated (quasi-)two-dimensional electron gas embedded in an optical microcavity is considered as a mediator for the cavity photon relaxation. Corrections to the electron gas spectrum due to the screened Coulomb interaction is obtained in the Hartree-Fock approximation. Spectrum corrections due to the photon exchange and modifications of the electron-photon vertices due to the screened interaction are estimated.

Рассматривается система фотонов в плоской оптической микрополости. Так как в поперечном направлении импульс фотонов квантован в силу граничных условий на зеркалах микрорезонатора, фотоны оказываются квазидвумерными и эффективно массовыми частицами. При этом они не взаимодействуют друг с другом, и потому могут релаксировать только при наличии активной среды, заполняющей микрорезонатор. Например, недавно бозе-конденсация фотонов была реализована в сферической ловушке микрополости, заполненной раствором органического красителя [1]. Однако, как известно, бозе-конденсация фотонов в микрополости возможна лишь в системе, в которой релаксация с сохранением числа фотонов гораздо сильнее, чем процессы, в которых число фотонов не сохраняется [2]. Задача настоящей

работы – предложить альтернативную систему, в которой может иметь место бозе-конденсация фотонов.

Основываясь на идее сильного взаимодействия фотонов с плотным электронным газом (в металле), предлагается использовать в качестве активной среды микрорезонатора свободный (слабо коррелированный) электронный газ. Рассматриваются две реализации: (а) слой полуметалла конечной толщины (т.е. квазидвумерный случай, см., например, [3]) и (б) монослой дихалькогенида переходных металлов (двумерный случай).

Электронный газ в режиме слабых корреляций описывается в приближении Хартри-Фока (ХФ) с экранированным кулоновским потенциалом. Данное приближение справедливо в случае малости отношения $V_{ex}(p)/K(p)$, где $V_{ex}(p)$ – добавка к спектру электронного газа за счет взаимодействия, а $K(p)$ – кинетическая энергия электронов. Причем ХФ-взаимодействие отлично от нуля лишь вблизи импульса Ферми, а при импульсах $p \gg p_F$ или $p \ll p_F$ им можно пренебречь.



Рис. 1. Диаграммы Келдыша с несохранением (левая) и сохранением (правая) числа фотонов. Для электронов учтено ХФ-взаимодействие.

Для получения параметров задачи, удовлетворяющих возможности бозе-конденсации фотонов, рассмотрены диаграммы в технике Келдыша, описывающие сохранение и несохранение числа фотонов (см. рис. 1). Функции Грина, входящие в диаграммы Келдыша, находятся из мацубаровской техники при низких температурах. Рассмотрены процессы как с сохранением числа фотонов (эффект Комптона, парное взаимодействие фотонов), так и с несохранением их числа (фотоэффект и др.). Вычислен спектр ХФ-электронов в квазидвумерии (и в двумерии, как в частном случае). Рассчитана поправка к электрон-фотонной вершине за счет двух ее модификаций: экранированным кулоновским взаимодействием и с участием промежуточного фотона. Найден режим, в котором обе модификации являются малыми.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 19-02-00793.

Список литературы

1. J. Klaers, J. Schmitt, F. Vewinger, and M. Weitz // *Nature* (London) **468**, 545 (2010).
2. I. Carusotto, C. Ciuti // *Rev. Mod. Phys.* **85**, 299 (2013).

В.В. МАРИНЮК¹, С.В. ШЕБЕРСТОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

МАЛОУГЛОВОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ СЛУЧАЙНОЙ СРЕДЫ С ДАЛЬНИМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ ФЛУКТУАЦИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

В работе изучено угловое распределение света, отраженного от мутной среды вблизи критической точки (точки фазового перехода). Многократное рассеяние на флуктуациях диэлектрической проницаемости описывается в рамках теории переноса излучения. Корреляционный радиус флуктуаций вблизи критической точки значительно превышает длину волны света, поэтому рассеяние света происходит преимущественно на малые углы (дифференциальное сечение рассеяния единицы объема уменьшается с углом рассеяния по степенному закону : $\mathcal{G}^{-2}$ [1]). Используя моделирование Монте-Карло, мы вычисляем угловую зависимость коэффициента отражения в широком диапазоне углов падения. Для не слишком больших углов падения найденное угловое распределение отраженного света практически не зависит от конкретной формы дифференциального сечения рассеяния, а угловой коэффициент отражения хорошо описывается известной формулой для изотропного рассеяния. При скользящем падении мы показываем, что угловой коэффициент отражения можно разложить на два вклада: диффузионный вклад и вклад света, испытавшего многократное малоугловое рассеяние. Последний отвечает за резкий максимум вблизи угла зеркального отражения. Используя аналитическое решение уравнения переноса излучения, получена простая формула для «малоуглового» вклада в коэффициент отражения.

V.V. MARINYUK, S.V. SHEBERSTOV

¹National Research Nuclear University "MEPhI"

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

SMALL-ANGLE REFLECTION OF LIGHT FROM A RANDOM MEDIUM WITH LONG-RANGE CORRELATIONS OF PERMITTIVITY FLUCTUATIONS

We study the angular distribution of light reflected from a turbid medium near a phase transition point. The reflection of light results from incoherent multiple scattering by permittivity fluctuations. In such media, the correlation length of the fluctuations is much greater than the wavelength of light, so the forward scattering dominates (differential cross section per unit volume decreases with the scattering angle according to the power law : $\mathcal{G}^{-2}$ [1]). Using Monte-Carlo radiative transfer simulation, we

calculate the angular reflectance in a wide range of incidence angles. For not too large incidence angles, the angular distribution of reflected light is found to be practically independent of a specific form of the differential cross section, and the angular reflectance is well described by the known formula for isotropic scattering. At grazing incidence, we show that the angular reflectance can be decomposed into two contributions, namely, the diffusion contribution and the contribution from light that experienced multiple scattering through small angles. The latter one is responsible for the prominent peak around the specular reflection angle. A simple explicit formula for this "small-angle" contribution is derived analytically from the radiative transfer equation within the small- angle approximation.

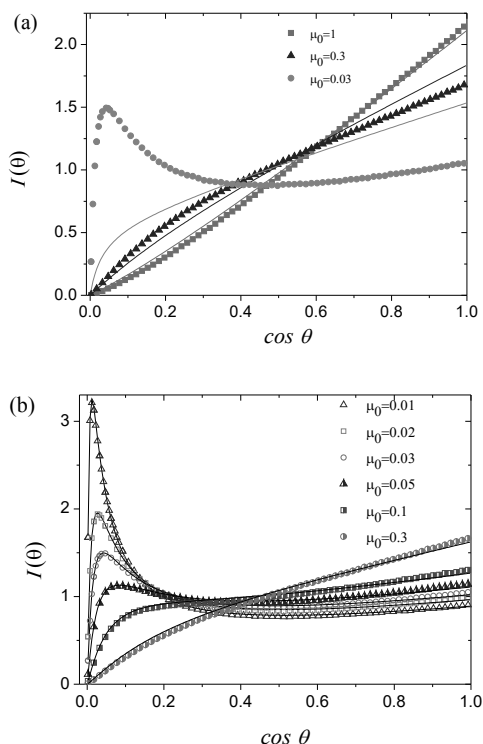


Рис.1.

Угловое распределение света, отраженного от среды вблизи критической точки для различных углов падения θ_0 , $\mu_0 = \cos \theta_0$. Символами показаны результаты численного решения уравнения переноса методом Монте-Карло.

(а) Сплошные кривые - угловое распределение света, отраженного от среды с изотропным рассеянием для тех же значений угла падения.

(б) Сплошные кривые – аналитическое решение уравнения переноса с учетом «малоуглового» вклада.

Список литературы

- [1] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Физматлит, 2005

А. А. МИРОНОВ, А. М. ФЕДОТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАСЧЕТ РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВОК К МАССОВОМУ ОПЕРАТОРУ В ПОСТОЯННОМ СКРЕЩЕННОМ ПОЛЕ

Обсуждаются некоторые аспекты вычисления и общее выражение для многопетлевых поляризационных поправок «пузырькового» типа к массовому оператору электрона в постоянном скрещенном поле.

A.A. MIRONOV, A.M. FEDOTOV

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

CALCULATION OF RADIATIVE CORRECTIONS TO THE MASS OPERATOR IN A CONSTANT CROSSED FIELD

We discuss certain aspects of calculation and the general expression for multi-loop bubble-type polarization corrections to the electron mass operator in a constant crossed field.

Нарожным [1] и Ритусом [2] было показано, что однопетлевые радиационные поправки к процессам КЭД (поляризационный и массовый операторы фотона и электрона соответственно) в постоянном скрещенном электромагнитном поле растут степенным образом при асимптотически больших значениях динамического квантового параметра χ (напряжённости поля в собственной системе отсчёта частицы). Такая ситуация существенно отличается от случая обычной КЭД, где при больших энергиях радиационные поправки растут логарифмически с ростом энергии. Существенно, что случай постоянного скрещенного поля не является специальным, поскольку к нему сводится широкий класс задач о процессах с участием ультрарелятивистских частиц в произвольном внешнем электромагнитном поле. На основе дальнейших расчетов вплоть до третьего порядка теории возмущений [3,4] была выдвинута гипотеза Ритуса-Нарожного [3-5] о том, что при $\chi \gg 1$ эффективным параметром разложения теории возмущений в КЭД в постоянном скрещенном поле является комбинация $\alpha\chi^{2/3}$, где α - постоянная тонкой структуры, причём основной вклад дают поляризационные диаграммы «пузырькового» типа (рис. 1). Если гипотеза верна, то при $\alpha\chi^{2/3} > 1$ теория возмущений в представлении Фарри

нарушается и возникает полностью непертурбативный режим, при котором наряду со взаимодействием с внешним полем следует также точно учитывать и все лидирующие радиационные поправки.

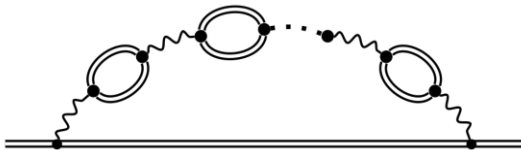


Рис. 1. Поляризационная поправка «пузырькового» типа к массовому оператору электрона. Двойные линии соответствуют пропагаторам электронов в постоянном скрещенном поле.

Для строгого обоснования гипотезы Ритуса-Нарожного необходимо рассмотреть и просуммировать лидирующие при асимптотически больших значениях параметра χ радиационные поправки в каждом порядке. В данной работе рассмотрены радиационные поправки «пузырькового» типа к массовому оператору с произвольным числом петель (рис. 1). Используя тот факт, что фотонный пропагатор в общем случае определяется только тремя независимыми поперечными тензорными структурами, которые можно построить из тензора напряжённости поля и 4-импульса фотона [1,2], установлен общий вид такого массового оператора. Обсуждаются некоторые особенности процедуры расчета радиационных поправок данного типа. В частности, показано, что в КЭД во внешнем поле можно проводить последовательную процедуру размерной регуляризации.

Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС” (проект No 17-12-276-1).

Список литературы

1. N.B. Narozhny, Sov. Phys. JETP. 1969. Vol. 28, No. 2, P. 371.
2. V.I. Ritus, Annals of Physics. 1972. Vol. 69, No. 2, P. 555.
3. N.B. Narozhny, Physical Review D. 1979. Vol. 20, No. 6, P. 1313.
4. N.B. Narozhny, Physical Review D. 1980. Vol. 21, No. 4, P. 1176.
5. A.M. Fedotov, Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 826, No. 1, P. 012027.

С.В. ПОПРУЖЕНКО¹, В.А. ТУЛЬСКИЙ^{1,2}

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

²*Institute of Physics, University of Rostock, Germany*

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ ИОНИЗАЦИИ ГАЗОВ БИХРОМАТИЧЕСКИМИ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Исследован эффект возбуждения плазменных колебаний в газовой мишени, ионизируемой лазерным излучением, состоящим из интенсивного фемтосекундного импульса инфракрасного диапазона длин волн и его второй гармоники. Для моделирования динамики плазмы использовался метод частиц в ячейках. Показано, что применение импульсов с циркулярной поляризацией и длиной волны (2–4) мкм, позволяет существенно, примерно на порядок, увеличить энергию колебаний и, как следствие, мощность излучаемых ими импульсов терагерцового диапазона частот. С ростом длины волны лазерной накачки увеличивается также длительность импульсов терагерцового излучения.

S.V. POPRUZHENKO¹, V.A. TULSKY^{1,2}

¹*National Research Nuclear University, Moscow, Russia*

²*Institute of Physics, University of Rostock, Germany*

GENERATION OF INTENSE TERAHERTZ RADIATION VIA IONIZATION OF GASES BY BICHROMATIC CIRCULARLY POLARIZED LASER PULSES

Excitation of plasma oscillations in a gas target ionized by intense laser radiation consisting of coherently superimposed intense femtosecond infrared laser pulse and its second harmonic was studied using particle in cells simulations. It was shown that the application of circularly polarized laser pulses with wavelengths (2–4) microns can lead to a considerable, order of magnitude increase in the energy of plasma oscillations. The power of terahertz radiation emitted by these plasma waves should therefore increase accordingly. It was also shown that the duration of terahertz pulses grows with increasing of the laser pump wavelength.

Разработка новых источников мощного импульсного излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот, является одним из актуальных направлений современной лазерной физики. Область применения таких источников потенциально очень широка и включает возбуждение переходов в молекулах и твердых телах, спектроскопию различных материалов,

неинвазивную диагностику в медицине и системах безопасности и др. [1]. В течение последних 10-15 лет активно исследуется метод генерации мощных ТГц волн, основанный на возбуждении фототока при ионизации газовых сред оптическим или инфракрасным (ИК) лазерным излучением, состоящим из основной гармоники высокой интенсивности и второй (или половинной) гармоники, интенсивность которой в 10-20 раз ниже. При этом основная гармоника производит ионизацию газа путем туннельного или многофотонного эффекта, а вторая гармоника создает асимметрию импульсного распределения фотоэлектронов, приводящую к возбуждению ненулевого остаточного тока, который и является источником ТГц излучения [2].

В большинстве экспериментов, выполняемых по такой схеме, используются линейно поляризованные лазерные импульсы с длиной волны основной гармоники 800нм. Максимальные значения амплитуды электрического поля ТГц волны достигают при этом нескольких МВ/см, а коэффициент конверсии ИК излучения в ТГц составляет порядка 10^{-4} . В недавних работах [3] было показано, что использование (1) циркулярно поляризованного лазерного излучения и (2) переход к излучению среднего инфракрасного диапазона с длиной волны накачки 2-4мкм приводит к дальнейшему увеличению выхода ТГц излучения и эффективности конверсии. Нами была исследована схема, сочетающая преимущества циркулярной поляризации и увеличенной длины волны [4]. При помощи расчетов, в которых для описания ионизации использовалось приближение сильного поля, а коллективные колебания образовавшейся электронной плазмы моделировались методом частиц в ячейках, было показано, что одновременное использование циркулярной поляризации и накачки среднего ИК диапазона с длиной волны (2-4)мкм может привести к увеличению полной энергии ТГц импульса в несколько десятков раз, а амплитуды электрического поля ТГц волны – почти на порядок по сравнению с величинами, достигнутыми с использованием линейно поляризованной накачки с длиной волны 800нм. Разработанная схема эксперимента, направленного на поиск предсказанных эффектов.

Список литературы

1. T. Kampfrath et al., Nat. Phot. **5**, 31 (2010); ibid **7**, 680 (2013); D. Sherman et al., Nat. .Phys. **11**, 188 (2015).
2. K.Y. Kim et al., Opt. Exp. **15**, 4577 (2007); V.A. Kostin and N.V. Vvedenski, Phys. Rev. Lett. **120**, 065002 (2018).
3. M. Clerici et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 253901 (2013); C. Meng et al., Appl. Phys. Lett. **109**, 131005 (2016).
4. V.A. Tulskey et al., Phys. Rev. A **98**, 053415 (2018).

С.В. ПОПРУЖЕНКО¹, М. ЧЬЯППИНА², С.В. БУЛАНОВ²,
Г. КОРН², Т. ДИТМАЙЕР³, С. ВЕБЕР²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ELI-Beamlines project, Prague, Czech Republic

³Center for High Energy Density Science, University of Texas at Austin, Austin, USA

ИЗМЕРЕНИЕ СВЕРХВЫСОКИХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКРАТНОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

В работе обсуждается метод прямого измерения интенсивности лазерного излучения в диапазоне 10^{20} – 10^{24} Вт/см², практическое достижение верхней границы которого ожидается в ближайшие годы. Метод основан на регистрации ионов максимальной кратности, образующихся в процессе последовательной туннельной ионизации атомов тяжелых элементов полем лазерного излучения. Показано, что из-за существенно нелинейной зависимости вероятности туннельной ионизации от величины электрического поля лазерной волны зарядовый спектр ионов будет ограничен резкой отсечкой со стороны больших значений Z . Измерение положения этой отсечки для нескольких элементов периодической таблицы позволяет дать достаточно надежную оценку пикового значения интенсивности в лазерном фокусе.

S.V. POPRUZHENKO¹, M. CIAPPINA², S.V. BULANOV²,
G. KORN², T. DITMIRE³, S. WEBER²

¹National Research Nuclear University, Moscow, Russia

²ELI-Beamlines project, Prague, Czech Republic

³Center for High Energy Density Science, University of Texas at Austin, Austin, USA

CALIBRATION OF ULTRAHIGH LASER INTENSITIES USING MULTIPLE IONIZATION OF ATOMS

We discuss a method for direct measurement of laser intensities in the interval 10^{20} – 10^{24} W/cm² whose upper limit is expected to reach in the nearest future. The method is based on time-of-flight registration of ions, including those of the maximal charge state, created in the process of sequential tunnel ionization of heavy atoms in the field of laser radiation. We show that due to the highly nonlinear dependence of tunneling ionization rates on the amplitude value of the laser electric field, the charge spectrum of ions will end by a sharp intensity-dependent cut-off. Detecting the position of this cut-off for different elements of the periodical table should provide a reliable measure for the peak value of the laser intensity in a focus.

В настоящее время в ряде ведущих мировых лазерных лабораторий ведется строительство установок сверхвысокой мощности, способных обеспечить поток энергии на мишени на уровне 5–10 петаватт [1]. Ожидается, что такие источники лазерного излучения нового поколения позволят достигнуть рекордных значений интенсивности 10^{22} – 10^{24} Вт/см². Переход к экспериментам на сверхмощных лазерных пучках делает актуальным вопрос о разработке новых способов измерения интенсивностей, поскольку стандартные методы оптической диагностики лазерного излучения в фокусе не работают при сверхвысоких плотностях потока энергии.

В данной работе анализируется метод диагностики сверхмощных лазерных пучков, основанный на измерении выхода многократно заряженных ионов тяжелых атомов, возникающих за счет туннельной ионизации лазерным излучением [2].

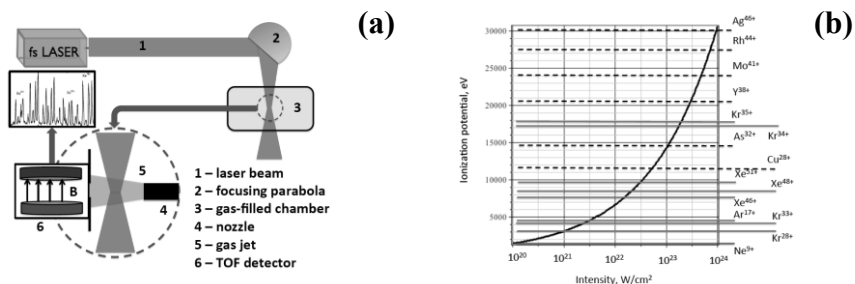


Рис.1: (a) принципиальная схема эксперимента и (b) зависимость максимального потенциала ионизации, при котором возможно образование ионов с вероятностью, близкой к единице за один лазерный период, от интенсивности в центре пучка (черная линия). Горизонтальными линиями показаны потенциалы ионизации различных элементов, включая благородные газы и металлы, которые предлагается использовать в качестве маркеров при диагностике интенсивности.

Предложенная схема прошла апробацию методами численного моделирования ионизационных каскадов в лазерном фокусе. В настоящее время разрабатывается план ее экспериментальной реализации.

Список литературы

- 1 C. Danson, D. Hillier, N. Hopps et al., *High Pow. Las. Sci. Eng.* **3**, e3 (2015); E. Cartlidge, *Science* **359**, 382 (2018).
- 2 M. Ciappina, S.V. Popruzhenko, S.V. Bulanov et al., submitted.

М.А. ПОСАЖЕНКОВ, Н.С. ВОРОНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И САМОЛОКАЛИЗАЦИЯ КОНДЕНСАТА ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ

Теоретически исследуется пространственно-временная динамика бозе-конденсата экситонных поляритонов в полупроводниковой оптической микрополости в присутствии резонансной импульсной накачки. Записана система уравнений Гинзбурга-Ландау для двух компонент поляритонного конденсата, которая решается методами численного моделирования. Описано распространение волн двухкомпонентного бозе-конденсата в пространстве. Проанализирован случай самолокализации конденсата за счет локального подогрева кристаллической решетки

M.A. POSAZHENKOV, N.S. VORONOVA

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

PROPAGATION AND SELF-LOCALIZATION OF AN EXCITON-POLARITON BOSE CONDENSATE

Space-time dynamics of an exciton-polariton Bose condensate in a semiconductor optical microcavity in the presence of resonant pulsed excitation is theoretically investigated. The two-component polariton condensate is described by a set of the Ginzburg-Landau equations, which is solved numerically revealing the solutions corresponding to the two-component condensate waves propagation in space. Self-localization of the condensate due to the local heating of the of the crystal lattice is considered.

Экситонные поляритоны – составные квазичастицы, возникающие при резонансном взаимодействии фотонов в микрорезонаторе и экситонов в квантовой яме [1]. Для описания экситон-поляритонного конденсата в двухкомпонентном подходе (на языке фотонной и экситонной подсистем с взаимопревращениями) была в общем виде записана полная система связанных уравнений Гинзбурга-Ландау:

$$\begin{cases} \hbar \frac{\partial \Psi_C(r, t)}{\partial t} = \left(E_C - \frac{\hbar^2 \Delta_r}{2m_C} \right) \Psi_C(r, t) - 2i\Gamma \Psi_C(r, t) + \Omega \hbar \Psi_X(r, t) + i\hbar S_C(r, t) \\ i\hbar \frac{\partial \Psi_X(r, t)}{\partial t} = \left(E_X - \frac{\hbar^2 \Delta_r}{2m_X} \right) \Psi_X(r, t) + \Omega \hbar \Psi_C(r, t) + g |\Psi_X(r, t)|^2 \Psi_X(r, t), \end{cases}$$

где $\Psi_C(r, t)$ и $\Psi_X(r, t)$ – волновые функции фотонной и экситонной подсистем поляритонного конденсата, E_C и E_X задают уровни отсчета энергии для фотонного и экситонного законов дисперсии. Слагаемые со

множителем $\Omega\hbar$ описывают взаимопревращение частиц (Ω – частота Раби). Утечка фотонов из полости отписывается линейным коэффициентом утечки Γ , а g – константа экситон-экситонного взаимодействия. Функция $Sc(r, t)$ описывает резонансную накачку фотонов в систему.

Задача решалась для случая импульсной накачки $Sc(r, t) = F_0 \exp\{-r^2/2R^2\} \exp\{-t^2/2T^2\}$, где R – радиус пятна накачки, а $2T$ – длительность импульса. Исследуемая система уравнений была обезразмерена, дискретизирована, и для ее решения был написан численный метод на базе неявной схемы с использованием метода линеаризации Ньютона для учета нелинейностей. На рис. 1 показаны результаты моделирования для двух выбранных моментов времени.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 18-32-20180 мол_a_дк.

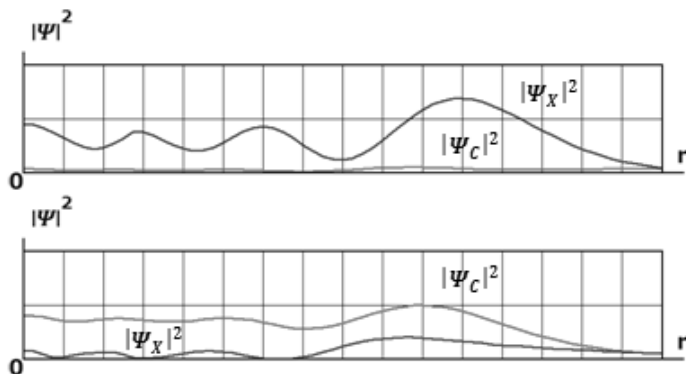


Рис. 1 Плотности фотонной $|\Psi_c(r)|^2$ и экситонной $|\Psi_x(r)|^2$ компонент конденсата, распространяющиеся от центра импульса накачки, в разные моменты времени, отвечающие эволюции после истощения пика импульса накачки. За счет существенной разницы в эффективной массе квазичастиц фотоны распространяются с гораздо большей скоростью, однако из-за постоянных взаимопревращений фотонов в экситоны и обратно, экситонная волна также движется в пространстве, находясь в противофазе (по времени) с волной фотонной компоненты.

Список литературы

1. A. Kavokin, J. J. Baumberg et al., *Microcavities*, Oxford University Press, Oxford, 2007.

А.П. СЕВЕРЮХИН

Лаборатория Теоретической Физики им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна, Россия

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ E1 ПЕРЕХОДОВ АТОМНЫХ ЯДЕР В ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ МАТРИЦ

Рассмотрены распределения силы гигантского дипольного резонанса в тяжелых сферических ядрах. Одно-фононные состояния получены в рамках приближения случайных фаз с помощью потенциала Скирма, тогда как двух-фононные состояния могут быть сгенерированы с помощью гауссовых ортогональных ансамблей.

A.P. SEVERYUKHIN

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, Dubna, Russia

RANDOM MATRIX ANALYSIS OF THE E1 STRENGTH DISTRIBUTION IN ATOMIC NUCLEI

We study the strength distributions of dipole giant resonances in heavy spherical nuclei. Our approach is based on the ideas of the random matrix distribution of the coupling between one-phonon and two-phonon states generated in the random-phase approximation.

Общая структура ширины распределения силы гигантского дипольного резонанса в ядрах в окрестности дважды магического ядра ^{208}Pb описана (в хорошем соответствии с доступными экспериментальными данными) с помощью идеи случайного распределения силы связи между одно- и двух-фононными состояниями [1]. Одно-фононные состояния получены в рамках микроскопического подхода с помощью потенциала Скирма, тогда как двух-фононные состояния могут быть сгенерированы с помощью гауссовых ортогональных ансамблей [2,3]. Такой подход предлагает эффективный механизм описания ширин распределения различных гигантских резонансов в микроскопических ядерных моделях, обеспечивающий удивительное сходство с эволюцией распада коллективного состояния вдоль иерархии связанных многочастичных конфигураций разной степени сложности, ответственных за формирование ширины распределения силы. Данное описание представляет несомненный интерес с точки зрения проявления квантового хаоса в конечных многочастичных квантовых системах.

Список литературы

1. Severyukhin A.P., Åberg S., Arsenyev N.N., Nazmitdinov R.G., Phys. Rev. C, **98**, 044319 (2018).
2. Severyukhin A.P., Åberg S., Arsenyev N.N., Nazmitdinov R.G., Phys. Rev. C, **95**, 061305(R) (2017).
3. Severyukhin A.P., Åberg S., Arsenyev N.N., Nazmitdinov R.G., Phys. Rev. C, **97**, 059802 (2018).

С.А. СУББОТИН, Н.С. ВОРОНОВА, Ю.Е. ЛОЗОВИК
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ГИДРОДИНАМИКА ХОЛОДНОЙ ЭКСИТОННОЙ СВЕРХТЕКУЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Рассмотрена система не прямых экситонов в лазерной ловушке с пространственно-разделенной накачкой. Применяется гидродинамическая модель к изучению кинетики экситонного бозе-конденсата в системе с круговой геометрией. Получен квадратичный гамильтониан и система интегрально-дифференциальных уравнений для профилей плотности и скорости конденсата экситонов.

S.A. SUBBOTIN, N.S. VORONOVA, YU.E. LOZOVIK
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

HYDRODYNAMICS OF COLD EXCITON SUPERFLUID

System of indirect excitons in a laser-induced trap with a spatially separated pump is considered. Hydrodynamic model is employed to study the behavior of the exciton Bose condensate with a ring geometry. As a result, we derive the quadratic Hamiltonian and a set of integro-differential equations for the stationary profiles of the exciton condensate density and velocity.

Экситон – это метастабильное связанное состояние возбужденного электрона и дырки [1], образующееся при возбуждении фотоном электрона из валентной зоны полупроводника в зону проводимости за счет кулоновского притяжения электрона с положительно заряженной дыркой, возникшей из-за этого перехода. Таким образом, экситон представляет собой электронейтральный композитный бозон. В эксперименте [2] система экситонов находится в ловушке, образованной лазером накачки с кольцевым профилем (рис 1а). Кольцо экситонов сужается (рис.1б, с), причем по мере движения к центру экситонная жидкость остывает до температур меньше 1 К и релаксирует в наинизшие энергетические состояния, тем самым способствуя предполагаемому образованию бозе-конденсата.

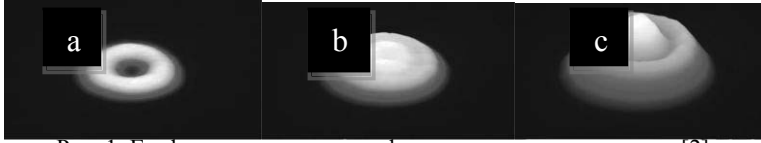


Рис. 1. Графики интенсивности фотолюминесценции экситонов [2].

Для описания динамики и спектра возбуждений образовавшейся системы применяется гидродинамическая модель [3], основанная на вариации функционала свободной энергии по возмущениям плотности и скорости жидкости над их равновесными значениями. Свободная энергия при наличии утечки имеет вид:

$$\mathcal{F} = \int \psi^*(r) \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \frac{1}{2} \int U(r-r') |\psi(r')|^2 dr' - \mu \right) \psi(r) dr + \frac{\hbar}{4} \int \frac{1}{\tau(r)} \left(\frac{\psi_0'(r)}{\psi_0(r)} \right) \psi(r) \psi^*(r) - \text{c. c.} \rangle dr \quad (1)$$

где $\psi(r) = \sqrt{\rho(r)} e^{i\phi(r)}$ – волновая функция системы, $\psi_0(r)$ – параметр порядка бозе-конденсата, $\tau(r)$ – локальное время жизни частиц, $U(r)$ – парный потенциал взаимодействия непрямых экситонов. В результате вариации свободной энергии (1) была получена система интегрально-дифференциальных уравнений для стационарных профилей плотности и скорости сверхтекучей жидкости с учетом круговой геометрии задачи, а также квадратичный по возмущениям гамильтониан системы. Уравнения на стационарный профиль плотности и скорости имеют вид:

$$\begin{cases} \left(\nabla \left(\rho_0(r) v(r) \right) - \frac{\sigma_0(r)}{\tau(r)} - \rho_0(r) v(r) \delta(s(r)) \nabla s(r) \right) = 0, \\ \left(\frac{\pi}{2} v^2(r) + \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{(\nabla \sigma_0(r))^2}{4\sigma_0^2(r)} - \frac{\nabla^2 \sigma_0(r)}{2\sigma_0(r)} + \frac{\nabla \sigma_0(r)}{2\sigma_0(r)} \delta(s(r)) \nabla s(r) \right) - \int U(r-r') \rho_0(r') dr' + \mu \right) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\rho_0(r)$ – равновесная сверхтекучая плотность, $v = \frac{\hbar}{m} \nabla \phi$ – скорость течения конденсата, $s(r)$ – уравнение границы рассматриваемой двумерной области. Вторая вариация свободной энергии (1) после квантования дает квадратичный по возмущениям гамильтониан системы:

$$\hat{H} = \int \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\rho_0(r) (\nabla \hat{\phi}'(r))^2 + \frac{2m v(r)}{\hbar} \hat{\rho}'(r) \nabla \hat{\phi}'(r) + \frac{\nabla \sigma_0^2(r)}{4\sigma_0^2(r)} (\hat{\rho}'(r))^2 - \frac{\nabla \sigma_0(r)}{4\sigma_0^2(r)} \hat{\rho}'(r) \nabla \hat{\rho}'(r) + \left(\frac{\nabla \sigma_0'(r)}{4\sigma_0(r)} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} \hat{\rho}'(r) \int U(r-r') \hat{\rho}'(r') dr' - \frac{\hbar}{\tau(r)} \hat{\rho}'(r) \hat{\phi}'(r) \right] dr \quad (3)$$

где $\hat{\phi}'(r)$ и $\hat{\rho}'(r)$ есть возмущения фазы и плотности, соответственно. Система уравнений (2) решается с помощью метода последовательных приближений для интегрально-дифференциальных уравнений [4] и позволяет определить стационарный профиль плотности и скорости конденсата, который может наблюдаться экспериментально. Гамильтониан после его диагонализации дает боголюбовский спектр изучаемой жидкости.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 18-32-20180 мол_а_дк.

Список литературы

1. R.S. Knox, *Theory of excitons*. New York: Academic (1963).
2. A.T. Hammack M. Griswold I.V. Butov et al. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 227402 (2006).
3. Wen-Chin Wu and A. Griffin, *Phys. Rev. A* **54**, 4204 (1996).

А.М. ФЕЩЕНКО^{1,2}, А.А. ТИЩЕНКО^{1,2}, М.Н. СТРИХАНОВ¹,
В.З. ВАГНЕР¹

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

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва,
Россия*

КОГЕРЕНТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ МОДУЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В СХЕМЕ КОМПТОНОВСКОГО ЛАЗЕРА

В данной работе мы проводим теоретическое исследование эффекта когерентности, возникающего при обратном рассеянии фотонов на периодически модулированном пучке релятивистских электронов. Процесс рассматривается как линейное томсоновское рассеяние плоской электромагнитной волны на последовательности ультракоротких электронных сгустков. В работе показана возможность использования электронных пучков с нанометровой модуляцией для генерации когерентного рентгеновского излучения в данной схеме, а также получено условие резонансного усиления интенсивности излучения, связывающее длину волны излучения с периодом модуляции электронного пучка. Развиваемый в работе аналитический подход может послужить полезным инструментом при разработке компактного и яркого источника когерентного рентгеновского излучения.

A.M. FESHCHENKO^{1,2}, A.A. TISHCHENKO^{1,2},
M.N. STRIKHANOV¹, W.Z. WAGNER¹

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

²*National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

COHERENT RADIATION FROM MODULATED ELECTRON BEAMS IN THE COMPTON LASER

In this work we study theoretically the effects of coherence in the backward scattering of photons on a relativistic periodically modulated electron beam. The process is considered as linear Thomson scattering of the plane electromagnetic wave by the train of ultra-short electron bunches. We demonstrate the possibility of using nm-modulated electron beams for generation of the coherent X-ray radiation in this scheme and derive the condition of resonant enhancement of the radiation intensity, linking the radiation wavelength with the modulation period of the electron beam. Our analytical approach can be a useful instrument in the design of the compact and high-brightness source of coherent X-ray radiation.

Перспективным инструментом в генерации рентгеновского излучения в широком частотном диапазоне является механизм обратного комптоновского рассеяния. Одним из главных преимуществ такой схемы является возможность использования электронных пучков с МэВ энергиями, в отличие, например, от лазеров на свободных электронах, требующих ГэВ энергий частиц. Поэтому комптоновские лазеры могут быть довольно компактными и недорогими по сравнению с современными установками третьего и четвертого поколений и, тем самым, более доступными для большего числа исследовательских лабораторий по всему миру.

Существующие на сегодняшний день электронные пучки фемтосекундных длительностей все еще не позволяют получать когерентное излучение в рентгеновском диапазоне, интенсивность которого пропорциональна квадрату числа электронов в сгустке. Для того чтобы излучение было когерентным, необходимо, чтобы длина пучка была меньше или, по крайней мере, сравнима с длиной волны излучения. Для модулированных электронных пучков достаточно того, чтобы это условие выполнялось для периода модуляции. Такие короткие электронные пучки сейчас присутствуют на Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах (European XFEL), способном генерировать когерентное рентгеновское излучение длиной волны от 0.05 – 4.7 нм. Однако это не единственная возможность получения аттосекундных электронных пучков - например, с помощью электронной дифракции на кремниевой решетке [1] или при взаимодействии интенсивного лазерного импульса в моде Лагерра-Гаусса с нанопроводом [2].

В данной работе мы предлагаем использовать модулированные электронные пучки для реализации эффективного комптоновского лазера. Используя метод, развитый ранее в работе [3] для форм-фактора модулированных сгустков, мы развиваем последовательную теорию томсоновского рассеяния электромагнитных волн на модулированных электронных пучках в рамках классической электродинамики, а также анализируем характеристики полученного излучения.

Список литературы

1. E.A. Nanni, W.S. Graves, D.E. Moncton, Phys. Rev. AB **21**, 014401 (2018).
2. L. Hu, T. Yu, Z. Sheng, J. Vieira, D. Zou and Y. Yin, Scientific Reports **8**, 7282 (2018).
3. D.Y. Sergeeva, A.P. Potylitsyn, A.A. Tishchenko, M.N. Strikhanov, Optics Express **25**, 26310 (2017).

Б. А. ТУЛУПОВ¹, М. Г. УРИН²

¹*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

²*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия*

ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРЯМЫХ+ПОЛУПРЯМЫХ $E1$ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ

Полумикроскопическая частично-дырочная дисперсионная оптическая модель применена к совместному описанию $E1$ фотопоглощения и прямых+полупрямых фото-нейтронных реакций, сопровождающихся возбуждением гигантского дипольного резонанса. На этой основе получена количественная оценка парциальных и полной вероятностей прямого однеитронного распада этого резонанса в ряде средне-тяжелых ядер с заполненными нейтронными оболочками. Результаты расчетов сравниваются с соответствующими экспериментальными данными.

B. A. TULUPOV¹, M. H. URIN²

¹*Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia*

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

SEMIMICROSCOPIC DESCRIPTION OF DIRECT+SEMIDIRECT $E1$ PHOTONEUTRON REACTIONS

The semimicroscopic particle-hole dispersive optical model is implemented to describe together $E1$ photoabsorption and direct+semidirect photoneutron reactions accompanied by excitation of the giant dipole resonance. Being based on this description, a quantitative estimation of the partial and total branching ratios for direct one-neutron decay of the mentioned giant resonance in a few medium-heavy neutron-closed-shell nuclei is obtained. Calculation results are compared with corresponding experimental data.

Прямые+полупрямые (ППП) фотонейтронные реакции широко используются наряду с фотопоглощением для экспериментальных и теоретических исследований свойств изовекторного гигантского дипольного резонанса (ГДР). Такие исследования позволяют получать информацию о структуре и механизмах распада ГДР. В представленной работе мы применили обладающую рядом уникальных возможностей частично-дырочную дисперсионную оптическую модель (ЧДДОМ) [1,2] к описанию упомянутых простейших фотоядерных реакций, а также

парциальных вероятностей прямого одноейтронного распада ГДР в ряде средне-тяжелых ядер с заполненными нейтронными оболочками. Указанные вероятности, определяются отношением проин-тегрированных по области ГДР минус-первых моментов соответствующих парциальных сечений $E1$ ППП ($,n$)-реакций и $E1$ фотопоглощения. В работе без использования свободных параметров проанализированы сечения ППП радиационного захвата нейтронов ядрами ^{140}Ce и ^{208}Pb , а также вероятности прямого одноейтронного распада ГДР в ядрах ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{140}Ce и ^{208}Pb . Новыми элементами анализа по сравнению с работой [3] являются уточнение в соответствии с [4] описания парциальных амплитуд ППП ($,n$)- и ($n,$)-реакций, а также расширение числа ядер, для которых анализируется прямой одноейтронный распад ГДР. Эта часть исследований мотивирована возможностью сравнения полной вероятности прямого одноейтронного распада ГДР, полученной из анализа сечения $^{48}\text{Ca}(e,e'n)$ -реакции [5], с соответствующей расчетной величиной. В применении к рассмотренным в работе вопросам намечены пути совершенствования модели.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 19-02-0060).

Список литературы

1. *Urin M. H.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 044330.
2. *Urin M.H.* // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 182. P. 02125.
3. *Tulupov B. A. and Urin M. H.* // Phys. Rev.C. 2014. V. 90. P. 034613
4. *Gorelik M. L., et al.* // Nucl. Phys. A. 2018. V. 970. P. 353.
5. *S. Strauch, P. von Neumann-Cosel P et al* / Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 2913.

К.С. КРЫЛОВ, К.П. КАТИН, М.М. МАСЛОВ, В.Д. МУР
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

НАСТРОЙКА КРИТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПРИМЕСИ В БЕСЦЕЛЕВОМ ГРАФЕНЕ МЕХАНИЧЕСКИМ РАСТЯЖЕНИЕМ

Брейт-вигнеровские резонансы в рассеянии дырок на закритической примеси в графене могут проявиться как пики на экспериментальных вольт-амперных характеристиках вблизи дираковской точки. Однородное растяжение бесщелевого графена позволяет осуществить тонкую подстройку скорости Ферми, а следовательно, и критического заряда примеси.

K.S. KRYLOV, K.P. KATIN, M.M. MASLOV, V.D. MUR
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

TUNING THE CRITICAL CHARGE OF IMPURITY IN GAPLESS GRAPHENE BY MECHANICAL STRETCHING

Breit-Wigner resonances in the scattering of holes by supercritical impurity in graphene can manifest themselves as peaks in the experimental current-voltage characteristics near the Dirac point. Homogeneous stretching of gapless graphene allows fine tuning of the Fermi velocity and, consequently, the critical charge of impurity.

Динамика носителей заряда вблизи дираковской точки в бесщелевом графене в присутствии заряженной примеси описывается эффективным двумерным радиальным уравнением Дирака для безмассовых фермионов с кулоновским потенциалом $V_c(\rho) = -q/\rho$.

Здесь ρ — безразмерный радиус, $q = Ze^2/\hbar v_F$ — эффективный заряд, $Z = Z_0/\epsilon$, где Z_0 — «голый» заряд примеси, ϵ — эффективная диэлектрическая проницаемость среды, а v_F — скорость Ферми. В силу аксиальной симметрии сохраняется полный угловой момент [1] $\hbar J = \hbar(M + 1/2)$, причём в двумерии возможно не только целое, но и полуцелое квантование орбитального момента, $M = 0, \pm 1/2, \pm 1, \dots$ [2,3].

Плавное изменение критического заряда [4] $q_c = |J|$ возможно за счёт однородного механического растяжения η бесщелевого графена:

$$Z_c = |J| \hbar v_F / e^2, \quad v_F = (0.827 - 1.13\eta) \cdot 10^6 \text{ м/с}, \quad 0 \leq \eta \leq 0.2.$$

Зависимость v_F от η получена методом функционала плотности.

При $q > q_c$ и $\epsilon < -1$ при упругом рассеянии дырок с энергией $\bar{\epsilon} = -\epsilon$ существенны квазистационарные состояния с энергией $\epsilon_p = \epsilon_0 - i\gamma/2$. В силу малой проницаемости кулоновского барьера [5] ширина уровня γ много меньше его положения $\epsilon_0, \gamma \ll \epsilon_0 \sim 1$. При малой надкритичности эти квазидискретные уровни могут

проявиться в виде брейт-вигнеровских резонансов, если энергия дырки близка к положению уровня, $\bar{\epsilon} \approx \epsilon_0$.

Квазисвязанные состояния с $J = 1/2$ в присутствии закритической примеси обсуждаются в работе [6]. В ней проведено сравнение экспериментальных вольт-амперных характеристик, т.е. спектров dI/dV , вблизи заряженных комплексов, собранных из $N = 1 \div 5$ димеров Са, с теоретическими расчётами, основанными на вычислении LDOS для кулоновской примеси с различными значениями заряда Z в рамках эффективного двумерного уравнения Дирака.

Единственным подгоночным параметром было отношение Z/Z_c , причём $Z_c \approx 0.25$ для $q_c = J = 1/2$ и $v_F \approx 10^6$ м/с, см. таблицу. При однородном 20% растяжении скорость v_F уменьшается в отношении $\tilde{v}_F/v_F \approx 4/5$, а вместе с этим увеличивается эффективный заряд $\tilde{q}$, см. таблицу.

N	1	2	3	4	5
$q/q_c = Z/Z_c$	0.5 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.4 ± 0.2	1.8 ± 0.2	2.2 ± 0.2
$\tilde{q}/q_c = Z/\tilde{Z}_c$	0.6 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.7 ± 0.2	2.2 ± 0.2	2.7 ± 0.2

Таким образом, докритический эффективный заряд кластера, состоящего из двух димеров Са, после 20% растяжения превращается в закритический эффективный заряд.

На экспериментальных спектрах dI/dV для примеси, состоящей из 5 димеров, ясно выражен пик вблизи дираковской точки, отвечающий резонансу в рассеянии дырки в состоянии с $J = 1/2$. Кроме того, при $\bar{\epsilon} \approx 0.4$ эВ намечается второй пик, которому нет аналога на теоретических спектрах. Возможно, он отвечает значению $J = 1$, т.е. полуполному орбитальному моменту $M = 1/2$, что, по-видимому, не учитывалось в теоретических расчётах. Для $J = 1$ критическое значение $Z_c^{(1)} = 2Z_c^{(1/2)} \approx 0.5$, так что значение $Z/Z_c^{(1)} \approx 1.1$ находится в пределах экспериментальной точности и может быть увеличено за счёт однородного растяжения. Это приведёт к закритической ситуации для состояний с полуполным орбитальным моментом в бесщелевом графене и требует отдельного рассмотрения.

Список литературы

1. DiVincenzo D.P., Mele E.J. // Phys. Rev. B 1984. Vol. 29, P. 1685–1694.
2. Pauli W. // Helv. Phys. Acta 1939. Vol. 12, P. 147–167.
3. van Winter C. // Ann. Phys. 1968. Vol 47, P. 232–274.
4. Pomeranchuk I., Smorodinsky Ya. // J. Phys. USSR 1945. Vol. 9, P. 97–100.
5. Мур В.Д., Попов В.С., Воскресенский Д.Н. // Письма в ЖЭТФ 1978. Т. 28, С. 140–144.
6. Wang Y., Wong D., Shytov A.V. et al. // Science 2013. Vol. 340, P. 734–737.

Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, Д.Б. РОГОЗКИН
Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

КОГЕРЕНТНОЕ ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ОТ СЛУЧАЙНОЙ СРЕДЫ С КРУГОВЫМ ДИХРОИЗМОМ

В работе обсуждается когерентное усиление обратного рассеяния поляризованного света от случайного ансамбля Ми-частиц, помещённого в однородную среду с круговым дихроизмом. Обнаружено, что отношение интерференционных вкладов в четвёртый и второй параметры Стокса обратно рассеянного излучения пропорционально величине кругового дихроизма. Это даёт новую возможность экспериментального измерения величины кругового дихроизма жидких оптически активных сред.

E.E.GORODNICHEV, D.B.ROGOZKIN
National Research Nuclear University "MEPhI"

Coherent backscattering from a random medium with the circular dichroism

We study the coherent backscattering of polarized light from a random ensemble of Mie-particles placed in a homogeneous medium with circular dichroism. It is found that the ratio of the interference contributions to the fourth and second Stokes parameters of backscattered radiation is proportional to the magnitude of circular dichroism. This gives a new opportunity to measure experimentally the magnitude of circular dichroism for liquid optically active media.

В настоящее время эффект когерентного усиления обратного рассеяния света широко используется в оптических исследованиях сильно рассеивающих сред [1]. По измерению угловой ширины, амплитуды и поляризационной зависимости интерференционного пика в интенсивности удаётся восстанавливать ряд важных характеристик структурно неоднородных материалов. Было показано [2], что увеличение с ростом размера неоднородностей амплитуды пика когерентного обратного рассеяния волн поляризованных ортогонально падающим, напрямую связано с эффектом медленного затухания циркулярно поляризованной моды.

Недавно было обнаружено [3,4], что сохранение циркулярной поляризации в рассеянном свете наиболее выражено для Ми-частиц, оптические параметры которых подчиняются первому условию Керкера [5]. Если поместить ансамбль таких частиц в однородную среду с круговым дихроизмом, то это должно, с одной стороны, значительно увеличить из-за рассеяния длину путей фотонов в среде, а с другой - не

нарушить состояния круговой поляризации распространяющихся в среде волн. Эти особенности распространения электромагнитных волн в рассеивающей среде с круговым дихроизмом должны отразиться на угловых распределениях поляризованных компонент в конусе когерентного обратного рассеяния.

В докладе обсуждается когерентное усиление обратного рассеяния поляризованного света от случайного ансамбля диэлектрических Ми-частиц, помещённых в однородную среду с круговым дихроизмом. Показано, что из-за наличия симметрии рассматриваемой системы относительно обращения времени, связь между интерференционными вкладами в поляризованные компоненты интенсивности отраженного излучения и элементами матричной функции Грина векторного уравнения переноса совпадает с найденной в [2] для оптически изотропных сред. В приближении пространственной диффузии излучения вычислены интенсивности поляризованных компонент излучения, отражённого вблизи направления точно-назад. Показано, что в случае падения линейно поляризованного света различия в угловых распределениях ко- и кросс-поляризованных волн обусловлены деполаризующими свойствами Ми-частиц, а при рассеянии излучения поляризованного по кругу - круговым дихроизмом среды. Обнаружено, что в режиме диффузии света, отношение разности когерентных вкладов в интенсивности волн, поляризованных по- и против часовой стрелки, к разности кросс-поляризованных компонент интенсивности всегда пропорционально величине кругового дихроизма. Найденные закономерности позволяют использовать измерения поляризованных компонент в конусе когерентного обратного рассеяния для определения оптических характеристик рассеивающих сред с круговым дихроизмом.

Список литературы

- [1]. Aegerter C.M. and Maret G., *Coherent backscattering and Anderson localization of light*, in *Progress in Optics*, **52**, 1 (2009).
- [2]. Городничев Е.Е., Кузовлев А.И., Рогозкин Д.Б., Письма в ЖЭТФ, **68**, 21 (1998); ЖЭТФ, **133**, 839 (2008).
- [3]. Schmidt M.K., Aizpurua J., Zambrana-Puyalto X., Vidal X., Molina-Terriza G., Saenz J.J., *Phys.Rev.Lett.*, **114**, 113902 (2015).
- [4]. Городничев Е.Е., Кузовлев А.И., Рогозкин Д.Б., Письма в ЖЭТФ, **104**, 155 (2016); Квантовая электроника, **46**, 947 (2016).
- [5]. Kerker M., Wang D.-S., Giles C. L., *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 765 (1983).

Секция ФИЗИКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ

Руководитель секции – д.ф.-м.н., заведующий ка-федрой № 4
Губин С.А.

Секретарь секции – Маклашова И.В.

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9917

E-mail: SAGubin@mephi.ru, IVMaklashova@mephi.ru

С.Ю. АНАНЬЕВ¹, А.Ю. ДОЛГОБОРОДОВ¹, Ф.А. АКОПОВ¹, Е.С. ЛУКИН⁵, Н.А. ПОПОВА², А.В. СОЛДАТОВ³, МАЗЕМ М.³, ЛИ Я.³, ВАЛДБОК Дж.⁴, ДОССОТ М.⁴, ДЕВО К.⁵, МАК РАЙ Э.⁶

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет им. Менделеева, Москва,

³Lulea University of Technology, Sweden

⁴CNRS-University of Lorraine, Villers-les-Nancy, France

⁵Institut Jean Lamour, Nancy, France

⁶Institut Jean Lamour, Vandoeuvre-les-Nancy, France

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И КЕРАМИКИ SiC С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОТРУБОК

Изучены характер повреждений и динамические пределы прочности одностенных и двустенных УНТ при ударно-волновом нагружении. Изготовлены композиты на основе керамики SiC различными добавками, армированные многостенными УНТ, изучена их структура и механические свойства в статических условиях (микротвердость, прочность на изгиб и др.), а также выполнены взрывные эксперименты по определению динамического предела упругости и откольной прочности.

S. YU. ANANEV¹, A.YU. DOLGOBORODOV¹, F.A. AKOPOV¹, E.S. LUKIN², N.A. POPOVA², A.V. SOLDATOV³, MASES M.³, LEE Y.³, WALDBOK J.⁴, DOSSOT M.⁴, DEVAUX X.⁵, MCRAE E.⁶

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

³Lulea University of Technology, Sweden

⁴CNRS-University of Lorraine, Villers-les-Nancy, France

⁵Institut Jean Lamour, Nancy, France

⁶Institut Jean Lamour, Vandoeuvre-les-Nancy, France

STRENGTH CHARACTERISTICS OF CARBON NANOTUBES AND CERAMIC SiC WITH NANOTUBES ADDITION

The fracture mode and the dynamic strength limits of a single-wall and double-walled CNTs under shock-wave loading were studied. Composites based on SiC ceramics with various additives and reinforced with multi-walled CNTs were made, their structure and mechanical properties were studied under static conditions (microhardness, bending strength, etc.), as well as shock-wave experiments to determine the Hugoniot elastic limit and spall strength.

Исследование направлено на изучение свойств двустенных (ДУНТ) и одностенных (ОУНТ) углеродных нанотрубок под динамическим воздействием высоких давлений и на определение давлений, выше которых происходят необратимые повреждения их структуры. Ударно-волновому нагружению подвергались ДУНТ с содержанием нанотрубок около 60% в исходном веществе, а также чистые (95%) образцы ДУНТ и ОУНТ. Образцы подвергались нагружению в ампулах сохранения до давлений 14-98 ГПа для ДУНТ и 19-52 ГПа для ОУНТ. Анализ образцов после нагружения проводился методами электронной микроскопии высокого разрешения и Рамановского рассеяния света. Результаты показали характер повреждений нанотрубок – они ломаются, сплющиваются и разворачиваются вдоль оси, образуя листы графена. Структурные повреждения нанотрубок увеличиваются с ростом давления в ударной волне. Пороговое давление прочности ДУНТ находится в промежутке между 26 и 30 ГПа, ОУНТ – между 19 и 26 ГПа, ближе к уровню 19 ГПа, что существенно ниже, чем при статическом сжатии [1]. Эффект от воздействия высокой температуры за короткий промежуток времени в эксперименте предполагался малым в сравнении с эффектом от воздействия давления.

В рамках работы изготовлены матричные композиты на основе SiC+МУНТ, изучена их структура и механические свойства в статических условиях. Полученные методом горячего прессования высокоплотные образцы с добавками аморфного бора пористостью менее 3% показали повышение пределов упругости и прочности на изгиб при статических воздействиях более чем вдвое по сравнению с керамикой на основе чистого карбида кремния. На основе результатов статических испытаний был проведен отбор наиболее перспективных образцов, для которых выполнены взрывные эксперименты по определению динамического предела упругости и откольной прочности. В сравнении с экспериментами по нагружению высокоплотной керамики SiC в других работах, измеренные значения динамического предела упругости композита SiC+МУНТ существенно ниже. Наиболее вероятной причиной отсутствия повышения динамической прочности является высокая остаточная пористость, поэтому требуется доработка технологии горячего прессования для получения более высокоплотных образцов.

Список литературы

- [1] M. Mases et al. // Phys. Status Solidi. 2012. Vol. 12, P. 2378.

А.Б. АНКУДИНОВ, М.И. АЛЫМОВ, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ, И.М.
МИЛЯЕВ

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

СИНТЕЗ МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ FE- CR-CO ИЗ СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА

Проведен синтез магнитотвердого материала из порошка сплава 25ХК15ЮБ сферической формы. Показано, что прессование порошка возможно только после предварительного помола. Исследованы магнитные гистерезисные характеристики спеченных образцов.

A.B. ANKUDINOV, M.I. ALYMOV, V.A. ZELENSKY,
I.M. MILIAEV

*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russia*

SYNTHESIS OF A HARD MAGNETIC ALLOY OF THE FE-CR- CO SYSTEM FROM SPHERICAL POWDER

Synthesis of a hard magnetic material from spherical powder alloy was carried out. It is shown that the pressing of the powder is possible only after preliminary grinding. The magnetic hysteresis characteristics of the sintered samples are investigated.

Магнитотвёрдые однофазные сплавы системы Fe-Cr-Co занимают заслуженное место среди магнитотвёрдых материалов. Синтез магнитного материала в ряде случаев целесообразно производить методами порошковой металлургии. Обычно для синтеза сплавов применяют производимые промышленностью коммерческие порошки из чистых элементов, которые смешивают, прессуют и спекают, используя отработанные технологические методы. При крупном производстве экономически выгоднее отказаться от использования элементных порошков и применять порошки сплавов с требуемым химическим составом.

В настоящей работе был использован порошок сплава 25ХК15ЮБ, полученный методом газового распыления. Прессование порошка в исходном состоянии, несмотря на высокое давление (600 МПа) и использование разъемной матрицы, оказалась невозможным – этому мешает сферическая форма порошка и высокая прочность сплава. Прессовки получаются расслоенными, а куски рассыпаются в порошок при слабом прикосновении. Поэтому дальнейшие эксперименты

выполнялись с порошками после предварительного помола. Помол выполняли на мельнице Pulverizette-7 на скорости 500 об/мин, на засыпку брали 10 г порошка и 70 г стальных шаров диаметром 3 или 5 мм. Время помола варьировалось и составляло 20 или 40 мин. Анализ результатов помола показывает, что применение 5 мм шаров предпочтительней – помол с 3 мм шарами в течение 20 мин не дает возможности получить бездефектные прессовки (см. таблицу).

Таблица: Качество прессовок из порошков после помола.

Режим помола	20 мин, шары 3мм	20 мин, шары 5мм	40 мин, шары 3мм	40 мин, шары 5мм
Качество прессовки	рассыпалась	удовлетворительное	удовлетворительное	хорошее

На рис. 1 представлены исходный порошок и порошки после помола в течение 40 минут. Отчетливо видно, что помол приводит к укрупнению порошков по сравнению с исходным сферическим. Разброс по размеру частиц после помола невелик в сравнении с исходным порошком, где диаметр сферических частиц лежит в диапазоне от 2 до 20 мкм. Также видно, что после помола с шарами диаметром 5 мм частицы имеют большую разность в размерах, чем при помоле с 3 мм шарами.

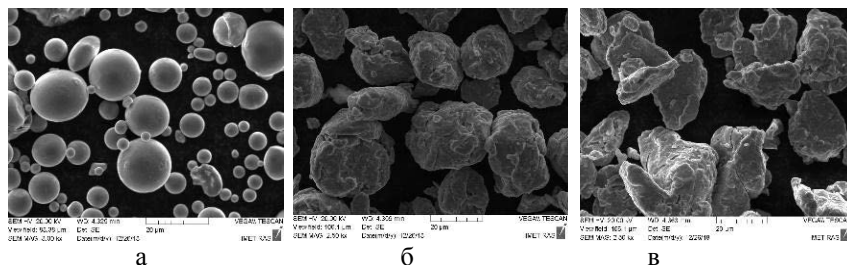


Рис. 1. Порошки: а) исходный сферический; после помола в течение 40 минут с шарами: б) 3 мм; в) 5 мм

Исследования магнитных свойств показали, что гистерезисные характеристики спеченных образцов имеют высокий уровень и не уступают значениям литых и порошковых магнитов, синтезированных из элементных порошков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-03-00666. Исследования методами электронной микроскопии и рентгенофазового анализа проведены с привлечением средств государственного задания № 007-00129-18-00.

С. М. ФРОЛОВ^{1,2,3}, И. О. ШАМШИН^{1,3}, В. С. АКСЕНОВ^{1,2},
И. В. БИЛЕРА⁵, В. И. ЗВЕГИНЦЕВ⁴, М. В. КОЗАЧЕНКО^{1,6},
П. А. ГУСЕВ^{1,7}

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук Москва; ²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия; ³Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, ⁴Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, ⁵Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук, ⁶Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ⁷Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,

ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА

Разработан термостат для пиролиза гранулированного полипропилена в диапазоне температур до 800 С. Определена детонационная способность продуктов пиролиза в смеси с воздухом в эталонной импульсной детонационной трубе диаметром 50 мм Показано, что горячие продукты пиролиза полипропилена обладают детонационной способностью, близкой к детонационной способности пропана при нормальных условиях.

S. M. FROLOV^{1,2,3}, I. O. SHAMSHIN^{1,3}, V. S. AKSENOV^{1,2}, I. V. BILERA⁵, V. I. ZVEGINTSEV⁴, V. V. KAZACHENKO^{1,6}, P. A. GUSEV^{1,7}

¹N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow
²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russian,
³Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, Moscow, ⁴S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
⁵A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences, Moscow, ⁶N. E. Bauman Moscow State Technical University, Russian, ⁷Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow

DETONABILITY OF AIR MIXTURES OF THE POLYPROPYLENE PYROLYSIS PRODUCTS

Granular polypropylene pyrolysis thermostat for the range of the temperatures of up to 800 C has been developed. Detonability of pyrolysis products mixed with air in a

standard pulsed detonation tube with a diameter of 50 mm has been obtained. It has been shown that the hot products of polypropylene pyrolysis have a detonability close to one of the propane under normal conditions.

Впервые рассмотрена возможность использования продуктов пиролиза твердых горючих в перспективных прямоточных воздушно-реактивных двигателях (ПВРД), работающих на детонационном горении. Предложен новый способ определения детонационной способности горючего: на основании измеренных значений длины и времени перехода горения в детонацию (ПГД) в эталонной импульсно-детонационной трубе общей длиной 3250 мм. Труба состоит из камеры сгорания, секции со спиралью Щекина, винтовой и гладкой измерительной секций с 12 измерительными базами по 240 мм преимущественно. В каждом сечении размещались ионизационные зонды и датчики давления РСВ 113В24.

В качестве твердого горючего выбран гранулированный полипропилен. Спроектирован и испытан газогенератор объёмом 0,5 л для получения продуктов пиролиза полипропилена при температуре разложения от 650 °С до 800 °С. Хроматографический анализ продуктов показал, что они в основном состоят из пропилена C₃H₆, изобутена iso-C₄H₈, этана C₂H₆, метана CH₄, этилена C₂H₄ и пропана C₃H₈.

Проведены эксперименты по изучению ПГД в воздушных смесях горячих продуктов пиролиза полипропилена. Показано, что в смесях с воздухом, несколько обогащенных горючим (с коэффициентом избытка воздуха $0,73 \leq \alpha \leq 0,90$), при нормальном давлении и повышенной начальной температуре (60–90 °С) продукты пиролиза полипропилена обладают детонационной способностью, близкой к детонационной способности сжиженного углеводородного газа (СУГ) марки ПБА — пропан-бутан автомобильный — в стехиометрической смеси с воздухом при нормальных условиях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00076а).

Список литературы

- [1] Фролов С.М., Звегинцев В.И., Аксёнов В.С., Билера И.В., Казаченко М.В., Шамшин И.О., Гусев П.А., Белоцерковская М.С., Коверзанова Е.В. // Горение и взрыв, 2018, том 11, №4, с. 44 – 60.

Ж.А. АМИР, С. ТУРСЫНБЕК

Казахский Национальный Университет им.ал-Фараби, г.Алматы, Казахстан

ИЗУЧЕНИЕ ГОРЕНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ СОСТАВОВ С ДОБАВКАМИ УГЛЕРОДНЫХ ПОРОШКОВ

В данной работе изучено горение трехкомпонентной смеси нитрата натрия, магний и углерода, полученного карбонизацией скорлупы грецкого ореха и при измельчении элементов противогазов. Проведены термодинамические расчеты горения смеси с различным содержанием компонентов и измерены характеристики горения смеси $\text{NaNO}_3/\text{Mg}/\text{C}$ (60/20/20). Показана перспектива использования такой смеси в газогенераторных патронах.

Zh.A. AMIR, S. TURSYNBEK

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

RESEARCH OF THE COMBUSTION OF GAS GENERATOR COMPOSITIONS WITH ADDITIVES OF CARBON POWDERS

It was studied the combustion of a three-component mixture of sodium nitrate, magnesium, and carbon, obtained by carbonizing the walnut shell and during grinding of elements of gas masks in this work. Thermodynamic calculations of the combustion of a mixture with different content of components were carried out and the combustion characteristics of a mixture of $\text{NaNO}_3/\text{Mg}/\text{C}$ (60/20/20) were measured. The prospect of using such a mixture in gas-generating cartridges is shown.

Одним из требований к газогенераторным составам является высокая скорость горения. Наиболее часто для генерации газов используют нитроцеллюлозные пороха, а также взрывчатые вещества с высоким содержанием азота, такие как нитрат аммония, нитрат гуанидина и нитрогуанидин. В качестве окислителя в газогенераторных составах чаще всего применяется нитрат аммония в связи с тем, что он является дешевым и недефицитным продуктом и при сгорании не дает твердых веществ [1].

Известны [2] газогенераторные патроны NoneX в качестве недетонационных пиротехнических средств для разрушения горных пород и искусственных преград. В этих составах в качестве окислителя применяется аммиачная селитра в смеси с бездымным порохом. Такие заряды работают в режиме дефлаграции, не создают ударных волн и дробления.

В настоящей работе была поставлена цель, исследовать влияние углеродных порошков различной природы на горение газогенераторных составов на основе нитрата натрия и магния.

Для приготовления исходных смесей состава $\text{NaNO}_3 + \text{Mg} + \text{C}$ использовались порошок технического нитрата натрия (ГОСТ 19906-74), рассеянный на ситах с размером $100 \div 200$ мкм, а также порошки магния (Mg) марки МПФ-3 и углерода из элементов противогАЗа и скорлупы грецкого ореха.

Скорость горения составов измеряли методом перегорающих проволок. Для измерения температуры в волне горения использовали вольфрам-рениевые термопары (BP5/BP20).

Предварительные эксперименты показали, что равномерное распространение пламени наблюдалось в волне горения в составе 60/20/20. Соответственно, в качестве рабочего был выбран состав с соотношением компонентов 60%- NaNO_3 , 20%-Mg, 20%-C.

Измерения температуры в случае углерода из противогАЗа температура в пламени достигает $\sim 1400\text{K}$, что приблизительно на 500K ниже термодинамического расчета. В случае углерода из грецкого ореха температура в пламени близка к термодинамическому расчету ($\sim 1900\text{K}$).

По данным РФА основными фазами в продуктах горения исследуемой смеси являются оксид магния и карбонат натрия.

Установлено, что достаточная высокая работоспособность и равномерность горения наблюдаются при соотношении исходных компонентов 60% - NaNO_3 , 20% - Mg, 20% - C. Определена дисперсность углерода, обеспечивающая послойное горение заряда. Это соответствует размерам частиц в пределах 100-200 мкм. Проведен рентгенофазовый анализ твердых продуктов горения. Показано, что основными продуктами являются оксид магния и карбонат натрия. Разработанные газогенераторные составы на основе нитрата натрия, магния и углерода могут быть рекомендованы для применения в открытых горных работах для раскалывания в шадящем режиме блочного камня или разрушения твердых минеральных пород.

Список литературы

- [1] Скиба Г.В., Давыдова И.В. // Добыча, обработка и применение природного камня. 2006. № 6.- С. 76-78.
- [2] Кирсанов О.Н., Островский В.И., Румянцев В.Н., Парамонов Г.П., Виноградов Ю.И. // Технология органических и неорганических веществ. 2005. Т.82, № 6. С. 278-286.

А.А. АНИКЕЕВ, Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. ГУБИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТЕОРИЯ ПРОСТЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ ЖИДКОГО АЗОТА

Рассмотрены методы моделирования химически реагирующих систем при высоких давлениях и температурах при помощи теории простых жидкостей. Проведено моделирование ударной адиабаты жидкого азота с учётом диссоциации и рекомбинации при помощи смесевой самосогласованной термодинамической теории интегральных уравнений для функций распределения.

A.A. ANIKEEV, YU.A. BOGDANOVA, S.A. GUBIN

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

THEORY OF SIMPLE LIQUIDS AND CHEMICAL EQUILIBRIUM. LIQUID NITROGEN SHOCK HUGONIOT SIMULATION

Simulation methods of chemically reactive systems at high temperatures and pressures using theory of simple liquids are considered. The liquid nitrogen shock Hugoniot are simulated with dissociation and recombination taken into account using self-consistent distribution function integral equation theory for mixtures.

Общепринятыми методами моделирования молекулярных систем являются молекулярный метод Монте-Карло (МС) и метод молекулярной динамики. Однако, вычислительная сложность атомистических методов чрезвычайно высока в случае итеративных алгоритмов для отыскания химического равновесия и решения уравнения ударной адиабаты.

Теория простых жидкостей предоставляет методы построения широкодиапазонных аналитических уравнений состояния, такие как термодинамическая теория возмущений (ТРТ) и теория интегральных уравнений для функций распределения (DFIET). Общая задача термодинамики может быть решена методом экстремума характеристических функций термодинамической системы. Методы теории жидкости позволяют найти избыточное давление и избыточную внутреннюю энергию по заданным температуре, плотности и парным молекулярным потенциалам молекул. Идеально-газовую составляющую внутренней энергии можно найти по калорическим полиномам [1,2]. Для

отыскания оставшихся характеристических функций необходимо найти ещё одну из них. Теория TPT позволяет найти значение свободной энергии Гельмгольца, но имеет трудности с описанием смесей [3,4]. На основе DFJET можно получить самосогласованное [5] многокомпонентное [6] широкодиапазонное приложение Орнштейна-Цернике (SCOZA) [7], но свободную энергию Гельмгольца необходимо искать через соотношения Максвелла [8] или с использованием дополнительных соотношений для замыкающего уравнения [9] при возможности их найти.

Предложенные модели были использованы при моделировании ударной адиабаты жидкого азота до 90 ГПа [10,11,12,13,14,15] с отысканием равновесного химического состава. Использовались параметры парных потенциалов EXP-6 из [16]. DFJET MHMSA лучше согласуется с MC, чем однокомпонентная TPT KLRR. Разница давлений, найденных методами MC и KLRR при одинаковых температуре и составе, не превышает 7%. Однако, отклонения между KLRR и MHMSA достигают 14% по степени диссоциации и 5% по температуре в случае термодинамического равновесия для каждой из моделей в отдельности. Большинство опубликованных параметров парных потенциалов найдено с использованием однокомпонентных методов [3] и могут вызывать ошибки при многокомпонентном моделировании смесей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00188).

Список литературы

- [1] Gurvich L., Yorish V., Yungman, V.// CODATA Bulletin 1985. № 58, P. 12-13.
- [2] Chase M.// NIST-JANAF Thermochemical Tables, 4th Edition. Journal of physical and chemical reference data, American Institute of Physics, 1998.
- [3] Ree F.// J. Chem. Phys 1982. Vol. 78, № 1, P. 409-415.
- [4] Bogdanova Yu.A., Gubin S.A., Anikeev A.A.// JPCS. 2016. Vol. 774, № 1, P. 012041.
- [5] Zerah G., Hansen J.-P.// J. Chem. Phys. 1985. Vol. 84, № 4, P. 2336-2343.
- [6] Kang H.S., Ree F.H.// Phys. Rev. E. 1998. Vol. 57, № 5, P. 5988-5992.
- [7] Anikeev A.A., Bogdanova Yu.A., Gubin S.A.// JPCS. 2015. Vol. 653, № 1, P. 012055.
- [8] Kirkwood J.G.// J. Chem. Phys. 1935. Vol. 3, № 5, P. 300-313.
- [9] Choudhury N., Ghosh S.K.// J. Chem. Phys. 2002. Vol. 116, № 19, P. 8517-8522.
- [10] Nellis W., Mitchell A.// J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73, № 12, P. 6137-6145.
- [11] Nellis W., Radousky H., Hamilton D. and others// J. Chem. Phys. 1991. Vol. 94, № 3, P. 2244-2257.
- [12] Marsh S.// LASL Shock Hugoniot Data. Los Alamos Scientific Laboratory Series on Dynamic Material Properties, Vol 5, University of California Press, 1980.
- [13] Zubarev V.N., Telegin G.S.// Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1962. Vol. 142, № 2, P. 309-312.
- [14] Ross M., Ree F.H.// J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73, № 12, P. 6146-6152.
- [15] Mochalov M.A., Zhernokletov M.V., Il'kaev R.I. and others// JETP. 2010. Vol. 110, № 1, P. 67-80.
- [16] Victorov S., Gubin S.// Proceedings of 13th IDS. 2006. P. 1118-1127.

А. АРТАМОНОВ¹, С.С. БАСАКИНА^{1,2}, П.В. КОМИССАРОВ²
¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²Институт химической физики им. Н.Н.Семенова Российской Академии Наук,
Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ В ЕМКОСТЯХ НЕБОЛЬШОГО ОБЪЕМА

При проведении экспериментальных подводных взрывов идеальных и неидеальных взрывчатых веществ (ВВ) в емкости небольшого объема обнаружен механический эффект движения емкости. Определены причины его возникновения и описаны особенности проведения работ в емкости небольшого объема. Рассматриваются взрывы зарядов массой до 30 г в емкостях объемом до 15 м³.

I.A. ARTAMONOV¹, S.S. BASAKINA^{1,2}, P.V. KOMISSAROV²

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

²N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia

PECULIARITIES OF EXPERIMENTAL UNDERWATER EXPLOSIONS IN THE SMALL-SIZE RESERVOIR

The undesirable effect of the water reservoir movement produced by the experimental underwater explosions of ideal and non-ideal explosives is discussed. The reason for such phenomena and possible ways how to avoid it are considered. The experiments with the charges with up to 30 g in water vessel of 15 m³ are investigated.

Эксперименты с зарядами малой массы проводились в небольшой емкости для исследования гидродинамики подводных взрывов алюминизированных смесевых составов. Из работ [1, 2] известно, что при проведении подводных взрывов в ограниченном объеме необходимо учитывать размеры резервуара и глубину расположения заряда. Однако, мы столкнулись с не описанными в литературе эффектами, в особенности при взрывах металлизированных составов. Эксперименты проводились в вертикальном цилиндрическом резервуаре, объемом 15 м³ и глубиной 3,5 м, вкопанном в грунт. При проведении подводного взрыва заряда аммонита массой 30 г, расположенного на глубине 1 м, при уровне воды в

емкости в 1,7 м было обнаружено, что емкость выдвигается вверх. Вероятно этот эффект связан с тем, что масса воды под зарядом была меньше, чем над ним. Из-за этого в ходе первой пульсации газового пузыря, наполненного продуктами детонации, происходит втягивание обеих (верхней и нижней) масс воды в сторону центра схлопывающегося пузыря. Причем, меньшая масса воды под пузырем начала двигаться к центру масс расположенного выше центра пузыря и потянула дно емкости вверх. При таком движении часть грунта осыпалась в образовавшуюся полость, что исключило опускание емкости на прежнее место. Для проверки был проведен опыт, в котором такой же заряд располагался на глубине 0,5 м, т.е. масса воды над зарядом была меньше массы воды под ним. В результате емкость осталась неподвижной.

Аналогичные эксперименты проводились с зарядом, состоящим из 30 г смеси алюминия ПАП-2, перхлората аммония и нитрометана (41,5; 41,5 и 17 вес. %) и расположенным на глубине 0,7 м. Перемещение емкости в этом случае было больше, чем при взрыве аммонита. Также в ходе опытов был обнаружен эффект движения стальных стенок емкости внутрь и затем наружу. Такие периодические движения стенок, по всей видимости, связаны с пульсациями газового пузыря после взрыва.

В результате проведения экспериментов с зарядами различного состава на различных глубинах были сделаны следующие выводы:

- при проведении подводных взрывов в емкостях небольшого объема во избежание движения емкости следует учитывать соотношения между массами воды над и под зарядом, для чего следует определять оптимальную глубину расположения заряда;
- емкость следует снабдить наружными шпангоутами для предотвращения колебаний стенок;
- на дно емкости следует помещать покрытие, обеспечивающее прослойку воздуха между водой и дном по всей площади емкости.

Работа по исследованию движения емкости при подводном взрыве поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 16-29-01077). Выражается благодарность Федеральному Агентству Научных Организаций России (проект 0082-2018-0002, регистрационный код АААА-А18-118031490034-6) за финансовую поддержку экспериментальной части, связанной с подводными взрывами неидеальных ВВ.

Список литературы

- [1] G. Bjarnholt. // Propellants and Explosives. 1980. Vol. 5. Pp. 67-74
- [2] M. Hagfors, J. Saavalainen. // ISEE Proceedings. 2010. Vol. 1. Pp. 207-216.

С.С. БАСАКИНА^{1,2}, И.А. АРТАМОНОВ¹, П.В. КОМИССАРОВ²
¹*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*
²*Институт химической физики им. Н.Н.Семенова Российской Академии Наук,
Москва, Россия*

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАССИВА ВСПЛЫВАЮЩИХ ПУЗЫРЬКОВ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО СТЕНКАМИ ВОДОЕМА

Экспериментально исследовалось поведение пузырьковой колонны при различных режимах расхода воздуха и различных диаметрах пузырьков. Выявлены и описаны особенности движения массива всплывающих пузырьков в емкостях небольшого объема.

S.S. BASAKINA^{1,2}, I.A. ARTAMONOV¹, P.V. KOMISSAROV²
¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*
²*N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia*

CHARACTERIZATION OF THE FREELY ASCENDING UNDERWATER BUBBLE ARRAY IN CONFINED VESSEL

The results of experimental investigation on the behavior of air-water bubble flow at various volume fractions and diameters of bubbles in water are represented. The several peculiarities of ascending bubble column in confined vessel were found and discussed.

Из работ [1-3] известно поведение единичного всплывающего пузырька воздуха в зависимости от его характеристик и параметров окружающей среды. Также известны исследования поведения пузырьковых течений в неограниченном объеме [3, 4]. Однако характер движения массива всплывающих пузырьков все еще не до конца понятен и изучен. В частности не исследовано движение пузырьковой колонны в ограниченном стенками объеме. Поэтому было разработано устройство для создания в воде цилиндрической колонны равномерно распределенных всплывающих пузырьков. Эксперименты проводились при трех различных значениях расхода воздуха через устройство. Диаметр пузырьков варьировался от 4 до 10 мм. Контролировались размер, количество пузырьков на единицу объема жидкости, их форма и траектории всплытия. Высота колонны не превышала 3 м. Определялись

объемное содержание пузырьков в воде, скорость их всплытия и характер движения, а так же форма пузырьковой колонны в зависимости от ее длины.

Проведенные наблюдения продемонстрировали следующие особенности движения массива пузырьков в условиях ограниченного стенками водоема:

- Размеры пузырьков не зависят от давления подачи воздуха.

- Пузырьки движутся по спиралевидным траекториям, а их столкновения единичны. После слияния при столкновении, пузырьки практически сразу разделяются. На протяжении всей высоты пузырьковой колонны средний размер пузырька не изменяется.

- Большинство пузырьков имеет линзоподобную форму. При этом ориентация таких сплюснутых пузырьков постоянна и направлена поперек направления движения. Это явление, вероятно, происходит за счет эффекта Бернулли, снижающего давление на периферии пузырька в набегающем потоке воды.

- Скорость всплытия пузырьков не постоянна и снижается от центра к периферии колонны. Стоит отметить, что скорость всплытия единичного пузырька, определенная в работах [1-3], в 2-3 раза меньше, чем зафиксированная у пузырьков в колонне. Это может быть обусловлено тем, что истечение газа из устройства генерации пузырьков создает интенсивную циркуляцию жидкости в емкости, что, в свою очередь, приводит к увеличению скорости всплывающих пузырьков.

- Форма пузырьковой колонны близка к цилиндрической. Однако на высоте 30 см поперечный размер колонны уменьшается на 5-10%. Это может быть связано с тем, что при наборе скорости пузырьками, давление между ними снижается за счет эффекта Бернулли, что вызывает их сближение. По мере дальнейшего всплытия поперечный размер колонны несколько увеличивается из-за взаимного расталкивания пузырьков за счет снижения гидростатического давления.

Работа по исследованию движения массива всплывающих пузырьков поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-29-01077).

Список литературы

- [1] Б.В. Бошенятов. // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 6. С. 156-160.
- [2] А. В. Городецкая. // Ж. Физ. Хим. 1949. №23, Выпуск 1. С. 71.
- [3] С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. Гидродинамика газожидкостных систем. Изд 2-е. М., «Энергия», 296 с. 1976.
- [4] J. H. Milgram. // J.Fluid.Mech. 1983. Vol.133, P.345-376.

Ю.А. КУЗНЕЦОВА, Ю.В. БАТЬКОВ, А.М. ПОДУРЕЦ, В.Г.
СИМАКОВ, И.А. ТЕРЕШКИНА, М.И. ТКАЧЕНКО, И.Р. ТРУНИН
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, СарФТИ,
Саров, Россия*

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ДЕЙСТВИЯ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СПЛАВА АМг6. ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В работе приведены результаты расчетно–экспериментального исследования влияния времени действия растягивающего напряжения на процесс откольного разрушения алюминиевого сплава АМг6. В результате проведенных исследований показано, что при одинаковых условиях скоростного нагружения, значениях амплитуды ударной волны поврежденность образца возрастает с увеличением толщины ударника. Этот результат подтверждает наличие масштабного эффекта при отколе.

YU.A. KUZNETSOVA, YU.V. BAT'KOV, A.M. PODURETS, V.G.
SIMAKOV, I.A. TERESHKINA, M.I. TKACHENKO, I.R. TRUNIN
National Research Nuclear University MEPhI, SarFTI Sarov, Russia

INFLUENCE OF LIFETIME OF TENSILE STRESSES ON SPALL DAMAGE OF ALLOY АМг6. EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION

This work is devoted to the experiment-calculated study of an influence of one of these factors on spall damage, namely to a lifetime of tensile stresses. The subject of the investigation is АМг6 alloy that is widespread in industry, available for the use and easy-to-machine in a process of manufacturing. Consequently, the fulfilled studies show that the sample damage increases with increasing an impactor thickness under analogous conditions of high-speed loading at similar values of shock wave amplitude.

Исследование механизма разрушения материалов импульсными нагрузками представляет большой интерес для многих практических приложений, связанных с высокоэнергетическими процессами. К специфическому типу разрушения динамическими нагрузками относится откольное разрушение, которое, в общем случае, вызывается развитием кратковременных растягивающих напряжений внутри тела, образованных взаимодействием встречных волн расширения.

Для материалов различных классов исследовались физические аспекты процесса разрушения и развивались общие критерии откола, включающие в себя наиболее значимые для этого процесса параметры [1]. Результатом

исследований стало выявление ряда общих, не зависящих от материала, закономерностей, присущих откольному разрушению (образование зоны разрушения внутри образца, кинетический характер процесса разрушения, статистический характер распределения дефектов по размерам, механизм разрушения: хрупкий, вязкий и смешанный и т.п.). На откольное разрушение материалов оказывают влияние температура вещества, амплитуда ударной волны, время действия растягивающих напряжений, технология изготовления и термообработка материала [2].

Расчетно-экспериментальному исследованию влияния на процесс откольного разрушения одного из таких факторов – времени действия растягивающих напряжений – посвящена данная работа. Объектом изучения был выбран алюминиевый сплав АМг6, широко распространенный в промышленности, доступный в использовании и легко обрабатываемый при изготовлении.

В результате проведенных исследований показано, что при одинаковых условиях скоростного нагружения, значениях амплитуды ударной волны поврежденность образца возрастает с увеличением толщины ударника. Этот результат подтверждает наличие масштабного эффекта при отколе [3].

На рис. 1 показаны фрагменты структуры трех алюминиевых образцов после их ударного нагружения ударниками различной толщины $h_{уд}$ и с одной скоростью соударения ~ 500 м/с.

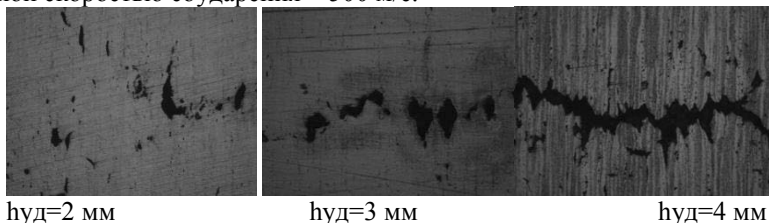


Рис. 1. Фотографии фрагментов структуры образцов после опыта (увеличение 100х).

Список литературы

- [1] Kanel G. I. // Int. J. Fracture. 2010.- №163. P. 173-191.
- [2] В.А. Огородников, В.А. Пушков и др. Основы физики прочности и механики разрушения. Учебное издание. РФЯЦ-ВНИИЭФ. г. Саров. 2007. 339 с.
- [3] Разрушение разномасштабных объектов при взрыве. Монография под ред. А.Г. Иванова. РФЯЦ-ВНИИЭФ г. Саров. 2001. 482 с.

Ю.А. БОГДАНОВА, И.В. МАКЛАШОВА,
С.А. ГУБИН, В.А. ВЫСОЦКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

**УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ГАЗООБРАЗНЫХ/ФЛЮИДНЫХ/ТВЕРДЫХ СИСТЕМ ДЛЯ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ
СВОЙСТВ**

Представлена методика получения универсальной теоретической модели уравнения состояния, позволяющей описывать как плотный многокомпонентный газ, так и конденсированные вещества (жидкая или твердая фазы). Эта модель обладает высокой точностью и значительно превосходит «компьютерные эксперименты» (методы Монте-Карло и молекулярной динамики) по быстродействию.

Yu.A. BOGDANOVA, I.V. MAKLASHOVA,
S.A. GUBIN, V.A. VYSOTSKI

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

**AN UNIVERSAL MODEL OF THE EQUATION OF STATE OF
MULTICOMPONENT GASEOUS / FLUID / SOLID SYSTEMS
FOR THE THERMODYNAMIC MODELING PROPERTIES**

A method for obtaining a universal theoretical model of the equation of state, which allows describing both dense multicomponent gas and condensed substances (liquid or solid phase), is presented. This model has high accuracy and exceeds “computer experiments” (Monte-Carlo and molecular dynamics methods) in speed.

Знание термодинамических свойств, фазового и химического состава сложных, многокомпонентных и многофазных химических реагирующих систем при высоких давлениях и температурах (единицы-десятки гигапаскалей и выше; тысячи Кельвинов) требуется в настоящее время в различных областях науки и техники, в том числе, в задачах физики и химии детонационных и ударных волн, геофизики, астрофизики и т.д.

Поэтому реалистичное термодинамическое моделирование параметров состояния и состава продуктов на основе теоретически обоснованных уравнений состояния в широком диапазоне давлений и температур имеет фундаментальное научное значение, и представляет практический интерес.

В работе представлена методика получения универсальной модели уравнения состояния (УРС), позволяющей прогнозировать термодинамические параметры плотных газов (флюидов) и конденсированных веществ, например сжиженных газов и металлов.

Эта методика основана на термодинамической теории возмущений Канга и др. [1, 2]. Основная идея теории возмущений заключается в выражении избыточной энергии Гельмгольца смеси в виде ряда Тейлора относительно базисного твердосферного флюида. Для описания взаимодействия частиц системы в газовой (флюидной) фазе используется модифицированный потенциал Букингема вида Exp-6, реалистичность которого в области высоких давлений и температур подтверждена многими исследованиями. Для межмолекулярного взаимодействия атомов твердых и жидких веществ, в том числе металлов и их расплавов, применяется парный трехпараметрический потенциал Морзе, позволяющий описать взаимодействие частиц в условиях статического сжатия [3].

Разработанная универсальная модель УРС верифицирована путем сравнения результатов расчета термодинамических свойств различных веществ (в газовой и конденсированной фазе) с доступными экспериментальными данными и данными моделирования методами Монте-Карло и молекулярной динамики.

Таким образом, на основе универсальной модели УРС можно рассчитать параметры состояния и состав сложных химических систем в любом агрегатном состоянии: газ, жидкость или твердое тело. Универсальность модели состоит в том, что для проведения расчетов необходимо знать лишь параметры соответствующего потенциала, реалистично описывающего взаимодействие между частицам исследуемого вещества.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00188).

Список литературы

- [1]. Victorov S.B., El-Rabii H., Gubin S.A., Maklashova I.V., Bogdanova Yu.A // Journal of Energetic Materials. 2010. V. 28, P. 35–49.
- [2] Bogdanova Yu.A., Gubin S.A., Victorov S.B., Gubina T.V. //High Temperature. 2015. V.53, P. 481-490.
- [3] Bogdanova Yu.A., Gubin S.A., Maklashova I.V., Kudinov A.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 946, Is. 1, Article number 012091.

А.С. БУРКАЦКИЙ, А.С. ЕГОРОВ, Д.А. ЛИТВИНОВ
*Саровский физико-технический институт — филиал федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Саров, Россия*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В КАВИТАЦИОННОЙ СРЕДЕ

Исследованы возникающие разности потенциалов в кавитационной среде: волновод — электрод, электрод — электрод. В работе показано, что напряжение возникает не только между волноводом и электродом из разных металлов как в работе [1], но и между волноводом и электродом из одного металла.

A.S. BURKATSKIY, A.S. EGOROV, D.A. LITVINOV
*Sarov State Physics and Technical Institute (Branch of the Moscow Engineering
Physics Institute), Sarov, Russia*

ELECTRICAL EFFECTS IN A CAVITATION ENVIRONMENT

Potential differences in the cavitation environment: waveguide - electrode, electrode- electrode were investigated. It is shown in this paper that voltage arises not only between a waveguide and an electrode made from different alloys, as in [1], but also between a waveguide and an electrode made of one alloy.

При облучении жидкостей ультразвуком за счет кавитации в ней образуются пузырьки, заполненные газом или парогазовой смесью [2, 3]. Высокая концентрация энергии при коллапсе пузырьков приводит к различным физическим эффектам: сонолюминесценции, ударным волнам, генерации звука и т.п. В таких кавитационных системах относительно недавно авторами [1] был обнаружен эффект появления разности потенциалов между волноводом ультразвуковой установки и электродом, выполненным из другого металла, располагающимся в объеме жидкости. Исследованию этого нового эффекта и посвящена настоящая работа.

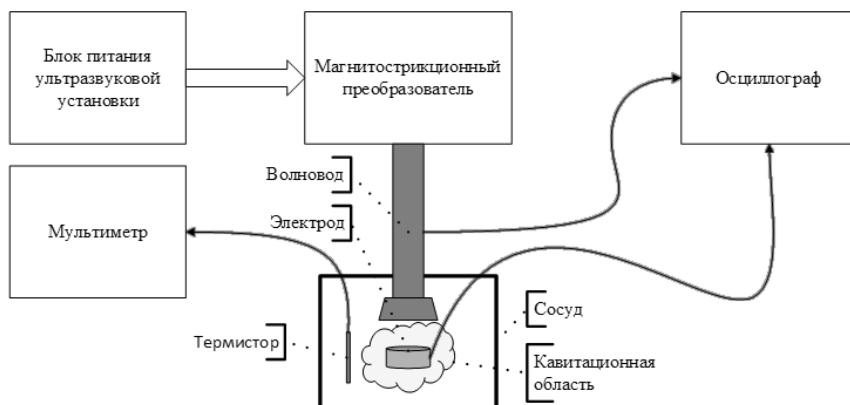


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Для создания кавитационной среды использовалась ультразвуковая установка «И100-6/1» с максимальной мощностью 600 Вт. Напряжение измерялось цифровым осциллографом LeCroy – WaveRunner 625Zi. Кавитационная среда создавалась в полипропиленовом сосуде, в качестве жидкости была выбрана дистиллированная вода с удельным сопротивлением около 200 кОм·см. В работе было несколько постановок экспериментов, измерялась разность потенциалов: волновод – электрод, электрод – электрод. Волновод выполнен из титанового сплава, электроды были из того же сплава, что и волновод, а также медные и железные электроды. Электрод (или два электрода) помещался в кавитационную область, температура регистрировалась непрерывно во время эксперимента с помощью термистора, подсоединенного к мультиметру Keysight 34465A, начальное значение температуры жидкости составляло примерно 20 °С.

Напряжение порядка нескольких сот милливольт при включении ультразвука возникало между двумя электродами и волноводом и электродом, выполненными как из разных, так и из одного материала. Амплитуда напряжения растет с увеличением мощности ультразвука.

Список литературы

- [1] Бирюков Д. А., Герасимов Д. Н., Синкевич О. А. // Письма в Журнал технической физики, 2014, Т. 40. №. 3. С. 90-94.
- [2] Маргулис М. А. // Успехи физических наук, 2000, Т. 170. №. 3. С. 263-287.
- [3] Борисёнок В. А. // Акустический журнал, 2015, Т. 61. №. 3. С. 333-333.

О.Е. ВАЙС, В.Ю. БЫЧЕНКОВ

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

**ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА
ДИНАМИКУ ЭЛЕКТРОНОВ, УСКОРЕННЫХ ИЗ ЕГО
ФОКУСА**

В работе рассмотрена задача взаимодействия остросфокусированного фемтосекундного лазерного импульса с электронами из ультратонкой нанофольги. В численных расчетах используется модель фокусировки лазерного импульса внеосевым параболическим зеркалом, что отвечает требованиям потенциальных экспериментов. Проведен анализ влияния длительности лазерного импульса на энергетические характеристики частиц.

O.E. VAIS, V.YU. BYCHENKOV

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

**IMPACT OF THE SPATIAL-TEMPORAL CHARACTERISTICS
OF THE LASER PULSE ON DYNAMICS OF ELECTRONS
ACCELERATED FROM ITS FOCUS**

The report is devoted to the problem of the interaction of tightly focused femtosecond laser pulse with free electrons from ultrathin nanofoil. Numerical simulations are based on the model of laser focusing by off-axis parabolic mirror; it is corresponding to potential experiments. Analysis of impact of the laser duration on energy characteristics of protons has been performed.

Увеличение мощности лазерных установок, которое продолжается в настоящее время [1], открывает широкие возможности изучения поведения вещества в экстремальных условиях с высокой пространственно-временной концентрацией световой энергии. Однако, высокие интенсивности (вплоть до 10^{20} - 10^{23} Вт/см²), достигаемые в фокусе пучка, не могут быть напрямую измерены традиционными способами, а результаты экстраполяции результатов измерений при пониженной мощности не обладают высокой точностью. Новые методы могут быть построены на основе анализа спектрально-угловых распределений частиц (электронов и протонов), ускоренных из разреженного газа или ультратонкой нанофольги. Такие источники заряженных частиц позволяют не учитывать влияние частиц друг на друга, поэтому итоговые распределения определяются только параметрами лазерного импульса [2].

Создание теоретических основ данного метода заключается в последовательном анализе зависимостей энергетических характеристик ускоренных частиц от параметров лазерного импульса, которые в перспективе могли бы быть диагностированы предложенным способом. В данной работе рассмотрено влияние длительности остросфокусированного лазерного импульса на ускорение электронов из ультратонкой нанофольги. Расчеты показали, что, несмотря на уменьшение энергии лазерного импульса при уменьшении его длительности (при фиксированных остальных характеристиках), такое изменение пучка приводит к увеличению энергии электронов (Рис.1). Поскольку частица находится в наиболее интенсивной области всего несколько периодов, быстрое нарастание напряженности поля (как в случае более коротких импульсов) приводит к более эффективному ускорению частицы. Однако такие же результаты могут быть получены при ускорении частицы более интенсивным импульсом той же длительности (то есть при увеличении энергии) [3]. Таким образом, для одновременного измерения интенсивности и длительности лазерного импульса, необходимо иметь информацию о его энергии и временной форме.

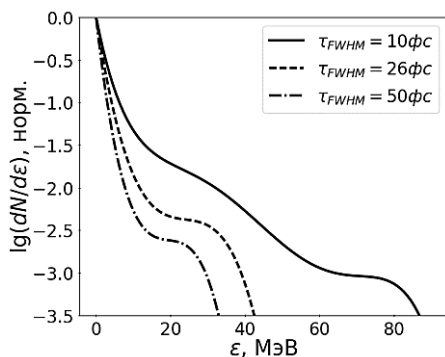


Рис. 1. Спектры электронов, ускоренных лазерным импульсом, сфокусированным в пятно диаметром 1.5λ с интенсивностью 10^{22} Вт/см².

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (№18-32-00406 мол_а).

Список литературы

- [1] Lasers. The ELI-Beamlines : <https://www.eli-beams.eu/en/facility/lasers/>
- [2] O.E. Vais, S.G. Bochkarev, V.Yu. Bychenkov. // Quantum Electron. 2017. Vol. 47. P. 38.
- [3] O.E. Vais, V.Yu. Bychenkov. // Appl.Phys.B. 2018. Vol. 124. P. 211.

П.А. ВЛАСОВ^{1,2}, В.Н. СМІРНОВ¹, О.Б. РЯБИКОВ¹,
А.С. БОГАТОВА², А.Р. АХУНЬЯНОВ²

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской Академии наук,
Москва, ²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ H₂/O₂ И H₂/O₂/CO В ОТРАЖЕННЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Проведены экспериментальные измерения временных зависимостей сигналов поглощения гидроксильными радикалами OH ($\lambda = 306.77$ нм, переход $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$) и излучения (эмиссии) электронно-возбужденных гидроксильных радикалов OH* ($\lambda = 310 \pm 4$ нм). Из этих измерений определены задержки воспламенения (по максимуму хемилюминесцентного излучения OH*) и построены температурные зависимости задержек воспламенения для различных исследованных смесей H₂/O₂ и H₂/CO/O₂. Также проведены детальные кинетические расчеты профилей электронно-возбужденных частиц OH* и их сравнение с экспериментально измеренными профилями для уточнения механизмов электронного возбуждения и тушения этих частиц.

P.A. VLASOV^{1,2}, V.N. SMIRNOV¹, O.B. RYABIKOV¹,
A.S. BOGATOVA², A.R. AKHYNANOV²

¹Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences. Moscow,
²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia

SELF-IGNITION OF H₂/O₂ AND H₂/O₂/CO MIXTURES BEHIND REFLECTED SHOCK WAVES

Time profiles of the intensities of the absorption by ground-state hydroxyl radicals OH at ($\lambda = 306.77$ nm) and the emission from electronically excited OH* radicals ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ transition, $\lambda = 310 \pm 4$ nm) were measured. Based on these measurements, the ignition delay time was determined, as the time interval between the time of arrival of the reflected shock wave and the time of reaching the maximum intensity of OH* emission. The corresponding temperature dependences of the ignition delay times for various H₂/O₂ and H₂/CO/O₂ mixtures were plotted. Detailed kinetic simulations of the profiles of electronically excited OH* radicals were performed and compared with the experimentally measured profiles to gain insights into the mechanism of the electronic excitation and quenching of these species.

Изучение самовоспламенения водородно-воздушных смесей имеет как фундаментальное, так и практическое значение, напрямую связанное с вопросами водородной энергетики, разработками новых экономически

выгодных и экологически безопасных двигателей и энергетических установок. Воспламенение водородно-воздушных смесей важно в контексте безопасной работы атомных электростанций. Свободный водород при определенном соотношении с кислородом воздуха образует чрезвычайно взрывоопасные смеси. Несмотря на обширные исследования и богатую историю изучения воспламенения смесей H_2-O_2 до сих пор не удается в рамках существующих кинетических моделей процессов воспламенения смесей H_2-O_2 описать всю совокупность имеющихся экспериментальных данных, особенно при низких температурах. Поэтому развитие методов контроля за работой энергетических и двигательных установок требует не только более точных знаний о процессах воспламенения и горения смесей H_2-O_2 , но и умения моделировать нештатные ситуации. Смесь H_2 и CO (синтез-газ) используется в качестве альтернативного экологически чистого топлива и в последнее время вызывает большой научный и практический интерес. Это связано с принятием во всем мире стратегии по сокращению и нейтрализации вредных выбросов в атмосферу при сжигании различных видов топлив. Существуют две основные причины большого интереса к синтез-газу. С одной стороны, горение синтез-газа можно использовать на практике вместо сжигания традиционных углеводородных топлив, что существенно уменьшает выброс вредных загрязнений в атмосферу. С другой стороны, вместо прямого сжигания угля, что является наиболее экологически вредным процессом, возможно преобразование угля в синтез-газ, а синтез-газа – в жидкие углеводороды, в частности, метанол.

В данной работе проведены эксперименты по измерению задержек воспламенения для большого количества различных смесей $H_2/O_2/Ar$ и $H_2/O_2/CO/Ar$ при температурах от 990 К до 2000 К и давлениях от 1 до 3 бар. Задержки воспламенения определялись по максимуму хемиллюминесцентного свечения электронно-возбужденных радикалов OH^* . Предложена детальная кинетическая модель для описания температурных зависимостей задержек воспламенения для различных давлений. Обнаружена выраженная зависимость от давления задержек воспламенения для смесей гремучего газа H_2/O_2 и различных смесей синтез-газа $H_2/O_2/CO$ в аргоне. Определены реакции, оказывающие наибольшее влияние на задержки воспламенения и профили электронно-возбужденных радикалов OH^* в смесях $H_2/O_2/Ar$ и $H_2/O_2/CO/Ar$. Увеличение содержания CO в реагирующей смеси приводит к заметной деформации профиля OH^* в кинетических расчетах и временной зависимости интенсивности излучения в эксперименте.

Е.Г. ГРИГОРЬЕВ¹, В.Ю. ГОЛЬЦЕВ², Н.С. ЕРМАКОВА²,
А.В. ОСИНЦЕВ², А.С. ПЛОТНИКОВ^{1,2}

¹Институт структурной макрокинетики РАН (ИСМАН), Черноголовка, Россия
²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ КОНСОЛИДАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрены основные особенности высоковольтной электроимпульсной консолидации порошковых материалов на примере тяжелых сплавов на основе вольфрама. Проанализированы электро-тепловые процессы на контактах между частицами порошка и в макромасштабе целого консолидируемого образца. Приведены результаты исследования структуры и прочности консолидированных тяжелых сплавов на основе вольфрама.

E.G. GRIGORYEV¹, V.YU. GOLTSEV², N.S. ERMAKOVA²,
A.V. OSINTSEV², A.S. PLOTNIKOV^{1,2}

¹The Institute of Structural Macrokinetics, Russian Academy of Sciences,
Chernogolovka, ²National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia

HIGH-VOLTAGE ELECTROIMPULSE CONSOLIDATION OF HEAVY ALLOYS

The main features of high-voltage electropulse consolidation of powder materials on the example of tungsten-based heavy alloys are considered. Electro-thermal processes at contacts between powder particles and at the macroscale of the whole consolidated sample are analyzed. The results of the study of the structure and strength of consolidated tungsten-based heavy alloys are given.

Метод электроимпульсной консолидации порошковых материалов [1] использует высокую плотность энергии электромагнитного импульса для производства материалов и изделий из электропроводных порошковых композиций. Достоинствами высоковольтной консолидации являются: высокая скорость нагрева, сравнительно низкие интегральные температуры, кратковременность процессов консолидации, возможность получения трудноспекаемых порошковых композиций, исключение необходимости дополнительной операции спекания. Возможности получения объемных наноматериалов с помощью этого метода придают ему особую актуальность.

Процесс высоковольтной консолидации (ВЭК) заключается в одновременном воздействии коротким ($<10^{-3}$ с) мощным импульсом тока

($10^5 - 10^7$ кА/м²) и внешним механическим давлением на порошковую заготовку [1]. Важной особенностью ВЭК порошковых материалов является концентрация высокой плотности выделяемой энергии в зонах межчастичных контактов порошковых частиц. Исходное состояние поверхности частиц порошка (толщина и структура окисных пленок, наличие посторонних примесей и т. п.), форма самих частиц порошка и их размеры, а также внешнее давление на порошковую заготовку существенно влияют на закономерности процессов высоковольтной консолидации. Наряду с этим, определяющими факторами являются: скорость ввода энергии электромагнитного поля в порошковый материал, характер и величина механического давления, воздействующего на порошковую заготовку в процессе высоковольтной консолидации. Высокая плотность энергии в зонах контактов частиц вызывает изменение агрегатного состояния вещества (твердого в жидкое и, частично, в плотную низкотемпературную плазму). Физические процессы в зонах межчастичных контактов характеризуются пространственной неоднородностью и нестационарностью во времени. Их изучение и выявление основных закономерностей поведения материала в зонах контактов частиц позволяет установить оптимальные параметры высоковольтной консолидации.

Экспериментально показано, что процесс уплотнения порошкового материала при высоковольтной консолидации имеет волновой характер [2]. Процесс уплотнения локализован во фронте волны, которая инициирована движением пуансона в порошковую заготовку и распространяется перед ним. Установлено также, что скорость фронта существенно зависит от амплитуды высоковольтного импульса тока, которая определяет интегральную температуру консолидируемого материала. Высокая скорость деформации порошкового материала в процессе высоковольтной консолидации реализуется механизмом пластического течения вещества порошка.

Приведены результаты электроимпульсной консолидации тяжелых сплавов на основе вольфрама, характеристики структурно-фазового состояния и прочности полученных образцов тяжелых сплавов.

Список литературы

- [1] Grigor'ev E.G.// Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2008, Vol. 72, № 9, P. 1210–1212.
- [2] Grigoryev E.G., Olevsky E.A., Yudin A.V. and others// Computational Materials Science, 2015, Vol. 100, part A. P. 8–14.

Е.Л. СТРИЖАКОВ¹, С.В. НЕСКОРОМНЫЙ¹,
В.Г. ВИНОГРАДОВ¹, Е.Г. ГРИГОРЬЕВ²

¹Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону,
Россия

²Институт структурной макрокинетики РАН (ИСМАН), Черноголовка, Россия

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Экспериментально и теоретически исследован процесс высоковольтной сварки разнородных материалов. Выявлены критерии, определяющие область технологических параметров для создания прочных сварных соединений. Приведены результаты экспериментального исследования структуры соединений разнородных материалов.

E.L. STRYZHAKOV¹, S.V. NESCOROMNIY¹,
V.G. VINOGRADOV¹, E.G. GRIGORIEV²

¹Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russia

²Institute of Structural Macrokinetics, Russian Academy of Sciences (ISMAN),
Chernogolovka, Russia

HIGH-VOLTAGE WELDING OF MULTIPLE MATERIALS

The process of high-voltage welding of dissimilar materials was experimentally and theoretically investigated. The criteria determining the area of technological parameters for creating durable welded joints are revealed. The results of an experimental study of the structure of compounds of dissimilar materials are presented.

Использование высоковольтного импульса электрического тока для создания неразъемных соединений позволяет локализовать высокую плотность энергии электромагнитного импульса в приповерхностной области контакта соединяемых деталей. Воздействие высоковольтного импульса электрического тока на контактирующие поверхности между соединяемыми деталями существенно изменяет их состояние. В зависимости от начального состояния контактирующих поверхностей, параметров импульса тока и величины приложенного давления в контактной области возможно как формирование прочного сварного соединения при оптимальных значениях параметров, так и взрывообразное разрушение зоны контакта. Сочетание короткого (длительностью $t \sim 10^{-6}$ с) электрического импульса (с амплитудой плотности тока $j \sim 10^8$ А/м²) и одновременного воздействия магнитного давления ($P_m \sim 10^8$ Па) вызывает высокоскоростную деформацию

материала в узкой зоне контакта, которая обеспечивает формирование прочного сварного соединения, не сопровождающееся диффузионными процессами в зоне сварки [1]. Анализ физических явлений, протекающих в контактной области при образовании сварного соединения [2], позволил определить ширину зоны термического влияния l_T :

$$l_T \leq \frac{1}{j} \sqrt{\frac{\kappa}{\rho} T_c} \quad (1)$$

где: ρ - удельное электросопротивление материала, T_c - характерная температура контактной зоны, κ - коэффициент теплопроводности материала. Как следует из формулы (1), основной нагрев материала до температуры $T \sim T_c$ и процессы деформации материала локализованы в непосредственной близости от контактной поверхности, в зоне шириной: $\sim 2l_T$. Из-за интенсивного нагрева материал в контактной зоне становится более пластичным, его вязкость снижается. Это способствует интенсивной пластической деформации материала в зоне сварки. Образование прочного сварного соединения происходит благодаря смятию начального профиля и высокоскоростной деформации материала контактирующих поверхностей сопровождающееся очисткой от окисных пленок. Существует ограничение на амплитуду плотности тока в контактной зоне сварки, превышение которой приводит к эффекту «электрического взрыва контакта» [2]. Теоретический анализ процессов, протекающих в контактной области [3] позволил установить критическое значение плотности тока j_* , при $j \geq j_*$ происходит «электрический взрыв контакта»:

$$j_* = \sqrt{\frac{2\xi\sigma}{\rho h}} T_b^2 \quad (2)$$

где: σ – постоянная Стефана – Больцмана; $\xi \leq 1$; T_b – температура кипения (потеря проводимости) материала, h – размер контактной области с температурой T_b .

Приведены экспериментальные результаты исследования структуры зон соединения из медного сплава М01 с латунным Л63, их энергодисперсионный анализ.

Список литературы

- [1] Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В. Сварочное производство, 2015, №3, С. 42-46.
- [2] Григорьев Е.Г., Базанов В.Н. // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Естественные науки. 2008, № 2, С. 84-88.
- [3] Grigoryev E.G., Olevsky E.A. // Scripta Materialia, 2012, Vol. 66, Issue 9, P. 662-665.

Д.А.ГОЖЕВ, С.Г.БОЧКАРЕВ, А.В.БРАНТОВ, В.Ю.БЫЧЕНКОВ
Физический институт РАН им.П.Н.Лебедева, Москва, Россия
**ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОТРАВОЙ И
НАНОСЛОЯМИ**

Исследовано лазерно-плазменное взаимодействие мощного фемтосекундного лазерного излучения релятивистской интенсивности со структурированными мишенями типа нанотрава и нанослой на поверхности плоской мишени с помощью 3D PIC моделирования. Были определены оптимальные параметры структур для получения наибольшей температуры горячих электронов, что требуют многие приложения. Выявлена важная роль стохастического нагрева при ускорении электронов в таких структурах.

D.A.GOZHEV, S.G.BOCHKAREV, A.V.BRANTOV,
V.YU.BYCHENKOV
P.N.Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia
**OPTIMIZATION OF THE GENERATION OF HOT
ELECTRONS IN THE INTERACTION OF A FEMTOSECOND
LASER PULSE WITH A NANOGRASS AND NANOSHEETS**

Relativistic femtosecond laser-plasma interaction with structured target such as nanograss and nanosheets at the planar target surface have been studied with 3D PIC simulations. The optimal parameters of the structures for obtaining the highest temperature of hot electrons were determined that is requested for many applications. An important role of a stochastic heating of accelerated electrons is revealed.

Исследование лазерно-плазменного взаимодействия с микро-структурированными различным образом мишенями весьма перспективно с точки зрения повышения поглощения излучения плазмой, роста энергии горячих электронов в усиленных локальных полях вблизи структур, эффективного объемного нагрева частиц. Использование этих эффектов важно для значительного улучшения ключевых параметров лазерно-плазменного источника вторичного электромагнитного и радиоактивного излучения). Нанотрава и нанослой являются одними из наиболее перспективных структур такого типа. В расчётах с помощью PIC-кода "MANDOR" исследовалось взаимодействие мощного фемтосекундного линейно-поляризованного лазерного излучения с длиной волны $\lambda=10$ мкм с интенсивностью $2 \cdot 10^{18}$ Вт/см² со структурированными мишенями

нанотрава и нанослой. Лазерное излучение распространялось в направлении нормали к поверхности мишени. Нанотрава в расчётах представляет из себя структуру, которая состоит из столбиков микронной длины и толщиной несколько сотен нанометров, расположенных на плоской поверхности мишени поперек нее. Электронная плотность мишени в расчётах была равна $50 n_{cr}$, где n_{cr} -критическая плотность. Нанослой представляет из себя структуру, состоящую из параллельных слоёв, расположенных на поверхности плоской мишени. Характерные параметры этой структуры схожи с параметрами нанотравы. В работе проводилась оптимизация параметров мишени (таких как, длина структур, толщина и расстояние между структурами) с целью увеличения энергии горячих электронов и увеличения поглощения лазерной энергии. Было обнаружено, что если расстояние между краями структур s мало (например, для глубины структурирования порядка $h/\lambda=1$ и расстояния $s/\lambda<0.6$), то лазерное излучение проникает в глубь мишени недостаточно и большая его часть отражается от поверхностной части структур. В результате, поглощается малая часть лазерной энергии и соответственно средняя энергия горячих электронов мало отличается от случая взаимодействия лазерного излучения с плоской поверхностью. Однако, при увеличении расстояния между структурами лазерное излучение хорошо проникает вглубь мишени, и средняя температура горячих электронов увеличивается. Кроме того, в результате проникновения лазерного излучения вглубь мишени возникает усиление генерируемых электрических полей. Было обнаружено, что интенсивность лазерного излучения в некоторых точках может увеличиваться на порядок. Это также способствует увеличению энергии горячих электронов. В результате, при оптимальных параметрах нанотравы средняя энергия горячих электронов возрастает с 70 кэВ для плоской мишени до 330 кэВ на структурированной. Аналогичные расчёты были проведены и для взаимодействия лазерного излучения с нанослоями. Эти расчёты показали, что несмотря на то, что средняя энергия горячих электронов на таких структурах меньше, чем на нанотраве, использование таких структур может помочь существенно увеличить температуру горячих электронов по сравнению с плоской мишенью. Так, средняя энергия горячих электронов на таких мишенях возростала до 270 кэВ, причем технология получения структурированных нанослоями мишеней значительно проще, чем мишеней типа нанотрава.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-02-00452 и 18-32-00406.

Л.И.ГРИШИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИТНЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

Проведено сравнительное исследование процессов энергосвободения пиротехнических составов термитного типа. В зависимости от таких параметров составов, как дисперсность, коэффициент уплотнения, начальная скорость и др. режим горения может переходить из конвективного в кондуктивный.

L.I. GRISHIN

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

COMPARATIVE STUDY OF THERMITE COMPOSITIONS FOR COMPACT HEAT SOURCES

A comparative study of the processes of energy release pyrotechnic compositions thermite type. Depending on the composition parameters such as dispersion, compaction coefficient, initial velocity, etc., the combustion mode can change from convective to conductive.

По результатам термодинамического анализа установлено, что состав Al/Cr_2O_3 имеет наименьшую адиабатическую температуру горения (2327 K), а состав Al/Co_3O_4 – наибольшую (3168 K). Расчет показал, что состав с Cr_2O_3 не имеет газообразных продуктов реакции. Анализ содержания продуктов реакции показал, что все составы имеют большое количество оксида алюминия в конденсированной фазе (~ 50%). Исследована микроструктура как отдельных компонентов (порошков) алюминия и оксидов металлов, так и микроструктура прессованных образцов, с которыми проводились эксперименты. Несмотря на просеивание, тщательное и продолжительное перемешивание исходных компонентов механическим образом, не удалось добиться равномерного прессования. Исследован процесс энергосвободения с помощью постоянного медленного нагрева образцов (10 K/мин) в инертной среде аргона со скоростью потока 100 мл/мин. У всех термитных составов, кроме состава с оксидом хрома, процесс энергосвободения происходит в 2 стадии, прерываясь плавлением алюминия, с последующим ростом выделения тепла при реакции расплавленного алюминия с кислородом.

Состав с оксидом кобальта обладает наибольшим энерговыделением (~1880 Дж/г).

Исследован процесс горения отобранных пиротехнических составов. Получены зависимости скоростей горения от относительной плотности (0.1-0.8) образцов. Скорости горения термитов с оксидами хрома, ванадия и кобальта составляют 2-15 мм/сек на всем промежутке плотностей, а состав с железом имеет ярко выраженный максимум на 27,6 мм/сек. Наличие экстремума скорости горения говорит о смене режима горения. Получены качественные выводы о существовании нескольких режимов при горении данных пиротехнических композиций.

Автор выражает благодарность Пивкиной А.Н., Муравьеву Н.В., Моногарову К.А., Меерову Д.Б. Работа была выполнена на оборудовании лаборатории энергетических материалов ИХФ РАН.

С.А. ГУБИН, И.В. МАКЛАШОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СИНТЕЗА АЛМАЗОВ

На основе анализа расчетных диаграмм фазового состояния крупнокристаллического и дисперсного углерода показано, что области термодинамической стабильности дисперсного алмаза смещаются в зависимости от размера, формы и внутренней структуры частиц как в область высоких давлений и температур, так и в область умеренных и нормальных давлений. Термодинамика определяет общие условия, необходимые для синтеза алмаза.

S.A. GUBIN, I.V. MAKLASHOVA

National Nuclear Research University "MEPHI", Moscow, Russia

THERMODYNAMIC CONDITIONS OF DIAMOND SYNTHESIS

The analysis of the simulated phase state diagrams of bulk crystal and dispersed carbon showed that the regions of thermodynamic stability for the nanodispersed diamond are shifted depending on the size, shape and internal structure of the particles both in the region of high pressures and temperatures, and in the region of reasonable and normal pressures. Thermodynamics determines the general necessary conditions for the synthesis of diamond.

Одним из важнейших технических достижений 20-го века является создание методов синтеза и промышленного производства алмазов. Техническая реализация синтеза алмаза оказалась возможной только после создания диаграммы фазового состояния углерода, из которой стало понятным, что для синтеза алмаза нужны высокие давления и температуры, соответствующие области термодинамической стабильности алмаза.

Первые синтетические алмазы были получены статическим (high pressure / high temperature, *HPHT*) и взрывным способами при ударно-волновом сжатии графита в ударных волнах и при детонации энергетических веществ с избытком углерода в молекулах в начале 60-х годов прошлого века. Позднее был разработан метод парофазного химического осаждения (chemical vapour deposition, *CVD*) для выращивания алмазных пластин и пленок, найдены и объяснены условия химического синтеза кристаллов алмаза из легких углеродосодержащих молекул (поликонденсация) без высокого давления. Стало понятным, что алмаз может синтезироваться в условиях далеких от области параметров термодинамической стабильности алмаза на диаграмме фазового

состояния углерода. Некоторые авторы пишут о метастабильной кристаллизации алмаза в условиях низких давлений. Поэтому возникает вопрос о роли термодинамики в создании современных технологий синтеза алмаза.

В термодинамике построение диаграммы фазового состояния вещества проводится из условия равенства химических потенциалов фаз. В свою очередь химические потенциалы и другие характеристические функции термодинамики находятся на основе уравнений состояния (УРС) вещества.

Для обычных крупнокристаллических фаз углерода (графит, алмаз, жидкий углерод) нами были получены УРС в форме Грюнайзена и найдены химические потенциалы углеродных фаз.

Для получения диаграммы фазового состояния нанодисперсного углерода с частицами разных размеров, формы и внутренней структуры предложена коррекция начальных плотностей наноалмаза и нанографита в УРС, а также стандартных значений энтальпии и энтропии твердых фаз углерода. Изменение энтальпии и энтропии нужно для учета высокой поверхностной энергии нанодисперсных фаз углерода.

Расчеты показывали, что положение линии фазового равновесия графит – алмаз зависит не только от размера и формы наночастиц, но и от внутренней структуры расположения атомов в нанокристалле. В случае кристаллов вытянутой формы типа «нити» или плоских тонких чешуек и пленок линии равновесия смещаются в область низких давлений и даже разрежения. При этом область термодинамической стабильности, в которой возможен синтез алмазных пленок и нитей расширяется, включая параметры разных методов синтеза алмазов.

Таким образом, показано, что в соответствии с термодинамикой синтез алмаза возможен в широкой области давлений и температур, при нормальных давлениях и даже при разрежении. Термодинамика определяет общие условия необходимые для синтеза алмаза. Достаточные условия задаются кинетикой, неравновесными условиями, определяющими конкретные скорости образования алмазной фазы в каждом отдельном методе синтеза алмаза.

А.С. ЕГОРОВ, А.С. БУРКАЦКИЙ, Р.В. КОЗАБАРАНОВ
Саровский физико-технический институт Саров, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПУЗЫРЬКОВОЙ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ПОЛЯРНЫХ И НЕПОЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Приведено сравнение световыхода сонолюминесценции в полярных (вода и глицерин) и неполярных (силиконовое масло) жидкостях с различными растворенными газами (воздухом, аргоном, криптоном, ксеноном). Получено распределение импульсов света по диапазонам амплитуд.

A.S. EGOROV, A.S. BURKATSKIY, R.V. KOZABARANOV
Sarov State Physics and Technical Institute Sarov, Russia

INVESTIGATION OF MULTIBUBBLE SONOLUMINESCENCE IN POLAR AND NONPOLAR LIQUIDS

A comparison of the light output of sonoluminescence in polar (water and glycerin) and non-polar (silicone oil) liquids with various dissolved gases (air, argon, krypton, xenon) was given. The distribution of light pulses over amplitude ranges was obtained.

Воздействуя акустическим полем высокой интенсивности на жидкость с растворенным в ней газом, можно создать осциллирующие пузырьки, которые при коллапсе испускают свет. Это явление получило название сонолюминесценции. В момент схлопывания в пузырьке достигаются большие значения плотности, температуры и давления. По некоторым моделям внутри пузырька достигаются температуры порядка 100 тысяч Кельвин. Можно говорить, что вещество в этот момент представляет собой плазму [1]. С момента открытия сонолюминесценции разработано множество методов исследования этого физического явления. Однако многое до сих пор остается неясным, в том числе – природа источника излучения [2]. Исследованию сонолюминесценции в различных системах жидкость–газ и рассмотрению основных моделей источника излучения и посвящена данная работа.

Для создания кавитационной среды использовалась ультразвуковая установка «И100-6/1». Волновод установки помещался в сосуд с исследуемой жидкостью, в котором и создавалась кавитационная среда. Удельное сопротивление воды составляло 100 – 300 кОм·см, удельное

сопротивление остальных жидкостей более 20 МОм·см. Перед началом каждого эксперимента жидкости охлаждались. Излучение регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя, подключенного к осциллографу. Температура регистрировалась непрерывно во время эксперимента с помощью термистора, подсоединенного к мультиметру. Импульсы излучения регистрируются группами. Это вызвано тем, что пузырьки имеют разное время коллапса. Период излучения очередной группы совпадает с периодом ультразвука, генерируемого установкой, и составляет примерно 23 кГц. В качестве примера на Рис.1 приведены осциллограмма сигналов и форма импульса с фотоэлектронного умножителя. Каждый сигнал соответствует коллапсу одного пузырька.

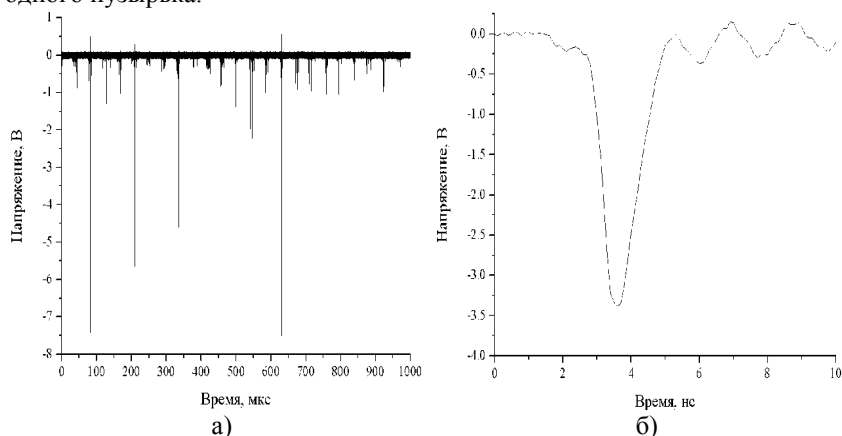


Рис. 1. Осциллограмма сигналов с ФЭУ (а), форма импульса с ФЭУ (б) в системе глицерин – ксенон.

Наибольший световыход получен в системе глицерин–ксенон. Наименьший в системе силиконовое масло–ксенон. Анализ полученных результатов показал сильное влияние используемой системы жидкость–газ на световыход сонолюминесценции. При прочих равных условиях преимущество имеют полярные жидкости.

Список литературы

- [1]Маргулис М. А. Сонолюминесценция, Успехи физических наук, 2000, Т. 170. – №. 3. – С. 263-287.
- [2]Борисёнок В. А. Сонолюминесценция: Эксперименты и модели (обзор), Акустический журнал, 2015, Т. 61. – №. 3. – С. 333-333.

Е.Н. ЕСОПОВ, К.Н.ПАНОВ, Д.Н.ЗАМЫСЛОВ,
М.О.ЛЕБЕДЕВА

*Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ-МИФИ, Саров,
Россия*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЧАСТИЦ ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛА РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Целью работы являлось сравнение количественных параметров потока частиц, выбрасываемых со свободной поверхности свинца под действием ударной волны, при ударно-волновом нагружении от заряда ВВ под инициатором и в месте столкновения детонационных волн от двух инициаторов, с использованием рентгенографического метода, пьезоэлектрической методики и методики PDV.

Проведено четыре взрывных эксперимента с использованием рентгенографической методики, пьезоэлектрических и контактных датчиков, а также методики PDV. Сделано сравнение результатов, полученных рентгенографической, пьезоэлектрической методиками и методикой PDV. Проведены расчетные оценки характеристик ударно-волнового пыления свинца и проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

E.N. ESOPOV, K.N.PANOV, D.N.ZYMYSLV, M.O.LEBEDEVA
*Sarov of Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear
University MEPhI, Sarov, Russia*

DETERMINATION OF THE DISTRIBUTION OF THE PARTICLE FLUX DENSITY AS THE SHOCK WAVE REACHES THE FREE METAL SURFACE BY THE X-RAY METHOD

The aim of the work was to compare the quantitative parameters of the particle flow emitted from the free surface of lead under the action of a shock wave, under shock-wave loading from the EXPLOSIVE charge under the initiator and at the point of collision of detonation waves (DV) from two initiators, using the x-ray diffraction method, piezoelectric technique and PDV technique.

Four explosive experiments were carried out using x-ray diffraction, piezoelectric and contact sensors, as well as PDV techniques. The comparison of results obtained by x-ray diffraction, piezoelectric methods and methodology of PDV. Calculated estimates of the characteristics of shock-wave dusting of lead were made and the results were compared with experimental data.

Процесс выброса частиц со свободной поверхности металлов под действием ударной волны (ударно-волновое «пыление») представляет

большой практический интерес. Несмотря на давнюю историю вопроса проблема количественного описания «пыления» остаётся актуальной.

На процесс выброса частиц влияет множество факторов – характеристики начальных возмущений на свободной поверхности металла, внутренние дефекты материала, профиль УВ, фазовое состояние металла и соответствующие реологические характеристики.

На экспериментальной базе РФЯЦ-ВНИИЭФ проведены исследования процессов пыления со свободной поверхности свинца с учетом разнодинамичности УВ и получены количественные характеристики пылевого облака под инициатором и в месте столкновения ДВ от двух инициаторов с использованием экспериментальных методик работающих на разных физических принципах: рентгенографический метод, пьезоэлектрический метод и методика PDV, результаты которых, хорошо согласуются между собой.

Специфика инициирования заряда ВВ позволила создать две зоны с разной интенсивностью ударной волны и сравнить характер «пыления» в двух зонах. В результате в зоне столкновения фронт облака частиц ($P=47$ ГПа) и откольно-разрушенная часть образца двигались быстрее, чем в зоне периферии ($P=36$ ГПа). Однако на количество выброшенной массы «пыли» это не повлияло. Существенное влияние оказывает шероховатость поверхности.

Список литературы

[1] М.В. Антипов, А.Б. Георгиевская, М.О. Лебедева, К.Н. Панов и др. Исследование процессов пыления с учетом разнодинамичности УВ, характерной для спецконструкций. Отчёт о НИР. ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ».

ИВАНОВ В. С.^{1,3}, ЗАНГИЕВ А. Э.¹, ФРОЛОВ С. М.^{1,2,3}

¹*Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук;*

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

³*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук*

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОДОРОДНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧИСЛОМ МАХА ПОЛЕТА 2 С ПОМОЩЬЮ МНОГОМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью разработанной в ИХФ РАН расчетной технологии проведены многовариантные трехмерные численные расчеты рабочего процесса в прямоточной воздушно-реактивной силовой установке, работающей на водороде, в условиях полета с числом Маха 2 на уровне моря. Показана возможность организации непрерывно-детонационного рабочего процесса в расширяющейся кольцевой камере сгорания. Предложены концептуальные схемы осесимметричной силовой установки с воздухозаборниками различной геометрии. Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 18-73-10196).

V. S. IVANOV^{1,3}, A. E. ZANGIEV¹, S. M. FROLOV^{1,2,3}

¹*N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, RAS, Russia*

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

³*Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Russia*

DESIGN OF THE CONTINUOUS-DETONATION HYDROGEN-FUELED RAMJET FOR A FLIGHT WITH MACH 2 USING MULTIDIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION

Using the computational technology developed at the ICP RAS, multivariate three-dimensional numerical calculations of the operation process in a hydrogen fueled ramjet at flight conditions with Mach 2 at sea level. The possibility of organizing a continuous detonation operation process in a diverged annular chamber of combustion is shown. Conceptual schemes of an axisymmetric ramjet with air intakes of various geometries are proposed.

This work was supported by the RSCF (grant No. 18-73-10196).

В работах [1 - 3] приведены результаты расчетов и огневых испытаний непрерывно-детонационного прямоточного воздушно-реактивного

водородного двигателя (ПВРД) в условиях сверхзвукового набегающего воздушного потока. Непрерывно-детонационный рабочий процесс с положительной эффективной тягой был реализован в диапазоне чисел Маха потока от 4 до 8. Нерешенным фундаментальным вопросом остается минимальное число Маха набегающего воздушного потока, при котором возможна организация непрерывно-детонационного рабочего процесса в таком ПВРД с получением положительной эффективной тяги.

Данная работа посвящена формированию облика водородного ПВРД для условий атмосферного полета с числом Маха 2 на уровне моря с помощью разработанной в ИХФ РАН расчетной технологии [1]. Рассмотрены конфигурации двигателя с различной геометрией воздухозаборного устройства (ВЗУ): трехскачковым ВЗУ внешнего и внутреннего сжатия и ВЗУ без сжатия набегающего воздушного потока.

Результаты расчетов с учетом внешнего обтекания двигателя доказали возможность организации устойчивого непрерывно-детонационного горения водородно-воздушной смеси с одной детонационной волной в осесимметричной расширяющейся камере сгорания с диаметром внешней стенки 120 мм. Чтобы обеспечить устойчивое детонационное горение водорода, в тракте двигателя в окрестности входного сечения потребовалось предусмотреть осесимметричные каналы для перераспределения избыточного давления. Наличие таких каналов способствует быстрому затуханию ударных волн, присоединенных к детонационной волне и бегущих вверх по потоку, и уменьшению потерь на заполнение тракта двигателя свежей топливной смесью. Показано, что детонационные ПВРД рассмотренных в работе конфигураций обеспечивают положительную эффективную тягу (более 1000 Н) при внешнем диаметре двигателя 120 мм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-73-10196).

Список литературы

- [1] Дубровский А. В., Иванов В. С., Зангиев А. Э., Фролов С. М. // Химическая физика, 2016, том 35, № 6, с. 49–63
- [2] Frolov S. M., Zvegintsev V.I., Ivanov V.S., Aksenov V.S., Shamshin I.O., Vnuchkov D.A., Nalivaichenko D.G., Berlin A.A., Fomin V.M., Shiplyuk A.N., Yakovlev N.N. // International Journal of Hydrogen Energy, 2018, Vol. 43, pp. 7515 – 7524
- [3] Фролов С. М., Звегинцев В. И., Иванов В. С., Аксенов В. С., Шамшин И. О., Внучков Д. А., Наливайченко Д. Г., Берлин А. А., Фомин В. М. // Физика горения и взрыва, 2018, т. 54, № 3, с. 116–123

Р.Д.КАПУСТИН, П.А.НИКОЛАЕНКО

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г Мерджанова
Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗРЫВА НА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРА С ЯЧЕИСТОЙ ОГНЕУПОРНОЙ ЭНЕРГОЗАЩИТОЙ

Аналитическими методами и экспериментально проведено исследование напряженно-деформированного состояния тонкостенной металлической оболочки при воздействии энергии детонации зарядов взрывчатого вещества различной массы. Проведена оценка энергопоглощающих свойств защитных слоев из твердого ячеистого огнеупорного материала, нанесенных на внутреннюю поверхность оболочки. Энергопоглощающая способность пористого материала определялась по напряжениям и деформациям в оболочке методом тензометрирования.

R.D.KAPUSTIN, P.A.NIKOLAENKO

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian
Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

RECEARCH OF THE EFFECT OF EXPLOSION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE METAL CONTAINER WITH POROUS REFRACTORY PROTECTION

The study of the stress-strain state of a thin-walled metal shell under the influence of the detonation energy of explosive charges of various masses by analytical methods and experimentally. The energy-absorbing properties of protective layers of solid porous refractory material deposited on the inner surface of the shell have been evaluated. Energy absorbing ability of a porous material was determined by the stresses and deformations in the shell by the method of strain gauging.

Исследована эффективность гашения энергии взрыва твёрдыми огнеупорными ячеистыми материалами, помещенными в тонкостенную металлическую оболочку с целью обеспечения энергопоглощения в результате деструкции всех ячеек (пор) при подрыве заряда ВВ.

Из анализа работ известно, что применять для гашения ударной волны более эффективно газожидкостные пены, однако они не технологичны и

имеют ограниченное время стойкости при эксплуатации [1].

Цель работы – по результатам аналитических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металлической оболочки, определить эффективность гашения энергии взрыва твердыми ячеистыми материалами (твердыми пенами).

Эксперименты проводились на образцах, представляющих собой тонкостенные металлические оболочки с энергопоглощающим слоем из твердого огнеупорного ячеистого материала плотностью $650\text{--}700\text{ кг/м}^3$, пористость до 70%. Металлическая оболочка по форме была приближена к сфере и представляла собой цилиндр с эллиптическими днищами.

Методика экспериментальных исследований предусматривала исследование напряженно-деформированного состояния металлических оболочек экспериментальных образцов методом тензометрирования в процессе подрыва внутри оболочки зарядов ВВ (тротил) различной массы.

Исследовались экспериментальные образцы двух видов: с защитным слоем из твердого ячеистого материала ВБФ-650 и «пустотелые». В первом случае энергопоглощающий материал располагался на внутренней поверхности металлической оболочки слоем толщиной 125 мм.

Измерительные узлы, состоящие из двух взаимно-перпендикулярных тензодатчиков, располагались в верхней и боковой части образца. В процессе испытаний были получены и обработаны осциллограммы нагружения оболочки образцов. По результатам разработана методика экспериментального определения энергопоглощающей способности твердых ячеистых материалов путём их помещения в замкнутую металлическую оболочку по изменению деформации этой оболочки.

Использованная в работе методика расчета напряженно-деформированного состояния металлической оболочки позволяет адекватно описать воздействие на неё взрывной волны/

Экспериментально установлено удельное объёмное энергопоглощение твердого пористого материала типа ВБФ-650 плотностью 650 кг/м^3 [2]. Применение твердых огнеупорных ячеистых материалов позволяет не менее, чем в два раза снизить отношение эффективной массы взрывозащитных металлических камер и контейнеров к массе заряда взрывчатого вещества.

Список литературы

- [1] Б.И. Паламарчук, А.Н. Манченко, А.В. Черкашин, А.Т. Малахов, В.А. Кулешов. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2009. Вип. 81.
- [2] R. D. Kapustin, P. A. Nikolaenko // Inorganic Materials: Applied Research, 2018, V. 9 (5). Pp 906–909.

Е.Б. ГОРДОН¹, А.В. КАРАБУЛИН^{1,2}, В.И. МАТЮШЕНКО^{2,3},
М.Е. СТЕПАНОВ²

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия*

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

³*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН,
Черноголовка, Россия*

ВЫРАЩИВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПРОВОЛОК УЛУЧШЕННОГО КАЧЕСТВА В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

В настоящей работе описывается усовершенствованная методика получения ультратонких ($d < 10$ нм) металлических нанопроволок в квантованных вихрях в сверхтекучем гелии (He II). Её использование позволяет существенно улучшить качество выращиваемых образцов, а именно существенно увеличить длину проволоки и избавиться от сферических включений большего по отношению к толщине проволоки диаметра.

E.B. GORDON¹, A.V. KARABULIN^{1,2}, V.I. MATYUSHENKO^{2,3},
M.E. STEPANOV²

¹*Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia*

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

³*The Branch of Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics of RAS,
Chernogolovka, Russia*

GROWING OF METAL NANOWIRES OF IMPROVED QUALITY IN SUPERFLUID HELIUM

This paper describes an improved technique for obtaining ultrathin ($d < 10$ nm) metal nanowires in quantized vortices in superfluid helium (He II). Its use can significantly improve the quality of the grown samples, namely, significantly increase the length of the wire and get rid of spherical inclusions of larger (in relation to the thickness of the wire) diameter.

Метод получения нанопроволок лазерной абляцией в объёме сверхтекучего гелия, реализованный в [1], несмотря на целый ряд преимуществ по сравнению с другими методами получения квазиодномерных объектов, имеет, тем не менее, один существенный недостаток, важный с точки зрения исследования размерных явлений в одномерных структурах. А именно, нанопроволоки содержат заметное количество сферических включений с большим по сравнению с толщиной нанопроволоки диаметром. Кроме этого, длина индивидуальной

нанопроволоки, обычно не превышает нескольких сотен нанометров, хотя состоящая из них паутина может достигать длины нескольких миллиметров.

Согласно предложенному в [2] механизму, накладывающему ограничение на размер сферических частиц образующихся в результате коалесценции холодных нанокластеров, причиной образования перечисленных дефектов является, по-видимому, слишком высокая концентрация первоначальных продуктов абляции, в результате которой нанокластеры не успевают остыть и сталкиваются в жидком состоянии, вырастая до больших размеров. Снижение концентрации путем простого уменьшения интенсивности лазерного излучения к желаемому результату не приводит: задолго до этого прекращается абляция.

Поэтому была предложена новая постановка эксперимента с вынесенной из сверхтекучего гелия металлической мишенью [3], расположенной в 2-3 мм над поверхностью сверхтекучего гелия. Исследование образцов из платины и индия с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали, что: 1) количество сферических включений радикально снижается; 2) длина индивидуальной нанопроволоки увеличивается практически на порядок (в поле зрения ПЭМ мы находили нанопроволоки длиной около 2 мкм); 3) сильно снижается выход получаемого продукта, что связано с тем, что значительное количество наночастиц металлов, получаемых во время абляции, уносится восходящим потоком гелиевого газа и не достигает поверхности жидкого гелия. Последний пункт, однако, не является существенным недостатком, т.к. он устраняется путём создания закрытой кюветы, не связанной напрямую с системой откачки.

Данная методика не только позволяет улучшить качество металлических нанопроволок, но и открывает возможность для получения биметаллических проволок и наногетероструктур «металл – неметалл» путём одновременной абляции нескольких мишеней.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00620).

Список литературы

- [1] E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, V. D. Sizov, and I. I. Khodos. // Low Temperature Physics 2010. Vol. 36 (7). Pp. 590–595.
- [2] E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, V. D. Sizov, and I. I. Khodos // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2011. Vol. 112 (6). Pp. 1061–1070
- [3] E. B. Gordon, M. E. Stepanov, M. I. Kulish, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, and I. I. Khodos, // Laser Physics Letters. 2019. Vol. 16 (2). P. 026002.

ANALOG MODELING OF REACTIVE SHOCK WAVES IN PERIODIC MEDIA

Wave propagation in periodic media is associated with a number of complex phenomena that have received considerable attention in the past. The majority of existing research is concerned with linear waves, and that already poses substantial theoretical and numerical challenges for computations of various wave-interaction processes.

Understanding shock waves and other nonlinear waves propagating in periodic or other heterogeneous media is also of interest from the fundamental and practical points of view. In this work, we take a step further in complexity in terms of nonlinear wave dynamics by considering reactive shock waves, such as detonations, propagating in media with periodically varying reaction properties. What makes this problem especially interesting is the possibility of resonant interaction between intrinsic instabilities that exist in the shock dynamics even in the absence of variations of properties of the medium and the instabilities caused by such variations.

The model we consider is based on the reactive Burgers equation proposed by [1, 2]:

$$u_t + 0.5(u^2 - uu_s)_x = s(x, u_s). \quad (1)$$

This model was derived assuming that upstream of the lead shock, the state was assumed uniform and given by $u_a = 0$. In this work, we generalize the model by considering a nonuniform upstream state with either a constant or periodically varying value of u_a .

We find that the upstream state influences both the stability of the steady-state traveling wave solutions, and the character of ensuing instabilities.

In particular, increasing u_a from zero, but keeping it constant, we find that it has a stabilizing effect on the solutions. When the upstream state is periodically varying, we find a variety of modes of interaction between the intrinsic dynamics of the wave and the periodic forcing arising from the upstream-state nonuniformities.

Figure below shows an example solution for the lead shock speed as a function of time when the upstream state varies slowly on the time scales of the detonation oscillations. We observe that the shock wave generally follows the

oscillations of u_a , except for periodic bursts of instability when the shock wave passes through the low-speed phase of oscillations.

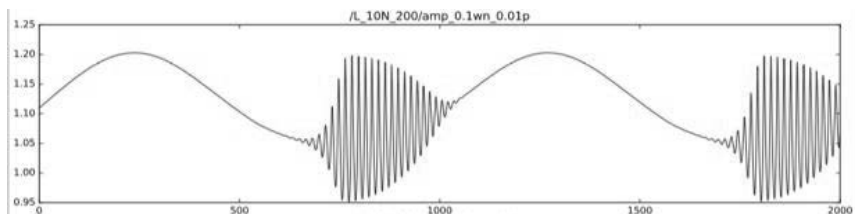


Figure 1. The beating phenomenon for $a = 3.9$, $b = 0.1$ (for these parameters, see [2]), and the amplitude of u_1 equal to 0.1.

Список литературы

- [1] Kasimov A., Faria L., and Rosales R. // Phys. Rev. Lett. 2013, Vol. 110, P. 104104.
- [2] Faria L., Kasimov A., and Rosales R. // SIAM J. Appl. Maths, 2014. Vol. 74(2). Pp. 547-570.

А.И. САВВАТИМСКИЙ¹, С.В. ОНУФРИЕВ¹, С.А. КОНЮХОВ^{1,2},
Н.Н. СЕРЕДКИН^{1,2}, Ю.Б. ПАТРИКЕЕВ³

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

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

³ОАО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва, Россия

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАДОЛИНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 2000-4000 К

Методом нагрева импульсом тока (длительность нагрева 5 мкс) измерены энтальпия, теплоемкость, электросопротивление жидкого гадолиния в зависимости от температуры при давлении не более нескольких десятков атмосфер. Экспериментальные данные выше 2100 К получены впервые.

A.I. SAVVATIMSKIY¹, S.V. ONUFRIEV¹, S.A. KONYUKHOV^{1,2},
N.N. SEREDKIN^{1,2}, Yu.B. PATRIKEEV³

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

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

³State Scientific-Research and Design Institute of Rare-Metal Industry "Giredmet" JSC,
Moscow, Russia

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF GADOLINIUM AT TEMPERATURES 2000-4000 K

The enthalpy, heat capacity, and electrical resistivity of liquid gadolinium were measured by the pulse current heating method (heating duration 5 μ s) as a function of temperature at a pressure of no more than several tens of bar. Experimental data above 2100 K are obtained for the first time.

В методе взрыва проводников [1] нагрев образцов осуществляется однократным импульсом тока малой длительности. Регистрация тока, напряжения на образце и сигнала пирометра в зависимости от времени нагрева позволяет рассчитать тепло, рассеянное в образце (энтальпию), теплоемкость и электросопротивление образца. Короткое время нагрева (~ 5 мкс) дает возможность пренебречь всеми видами тепловых потерь.

Гадолиний – элемент с наибольшим сечением поглощения тепловых нейтронов, его температура плавления – 1591 ± 10 К [2]. Измерения его свойств выполнялись на образцах фольги с размерами $0,084 \times 3 \times 15$ мм,

которые помещали между двумя пластинами с размерами $3,5 \times 8 \times 15$ мм: нижняя пластина – кварц КВ; верхняя – стекло К8. Образец приклеивали к нижней пластине. Для исходной фиксации стеклянной ячейки на боковые поверхности пластин наклеивали тонкие пластины (рис. 1). При нагреве образца в такой ячейке давление в нем растет вследствие его теплового расширения и инерционности пластин и, как показывают оценки, может достигать ~ 30 атм. Такое давление не сказывается на результатах измерений [3]. Температуру образца измеряли с помощью быстродействующего пирометра [4], калиброванного по температурной лампе. Нижний предел измерения – 2000 К. Для расчета температуры образцов использовали данные об отражательной способности жидкого гадолиния [5]. Полученная зависимость теплоемкости жидкого гадолиния от температуры показана на рис. 2. Погрешность измерения C_p – 15 %.

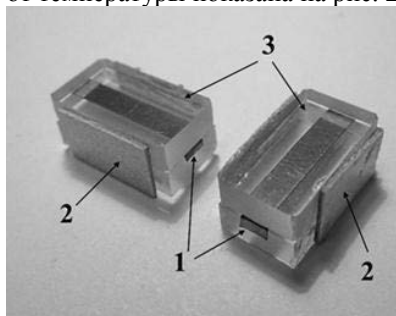


Рис. 1. Ячейки с образцами Gd: 1 – фольга гадолиния; 2 – приклеенные накладки, удерживающие пластины; 3 – стеклянные пластины.

При 2100 К полученные данные по C_p ($0,3 \text{ Дж/г}\cdot\text{К}$) в пределах погрешности измерений согласуются с данными [6]. Расчетные данные [2] ($C_p = 0,236 \text{ Дж/г}\cdot\text{К}$) при температурах $T_{\text{пл}}$ – 2500 К – несколько ниже измеренных нами (рис.2).

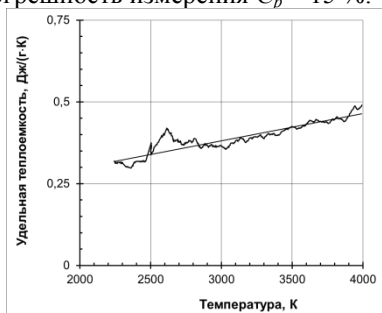


Рис. 2. Зависимость теплоемкости жидкого Gd от температуры. Показана линейная аппроксимация данных:
 $C_p(T) = 0,131 + 8 \cdot 10^{-5} T, \text{ Дж/}(\text{г}\cdot\text{К}).$

Список литературы

- [1] А. И. Савватимский, С. В. Онуфриев// Ядерная физика и инжиниринг, 2015, том 6, № 11–12, С. 622.
- [2] R.J.M. Konings, O. Beneš// J. Phys. Chem. Ref. Data. 2010. Vol. 39, No 4, P. 043102.
- [3] Onufriev, S.V. and Savvatimskii, A.I.// High Temp. 2018. Vol. 56, No 5, P. 678.
- [4] Onufriev, S.V.// Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., 2018. Vol. 82, No 4, P. 372.
- [5] Акашев Л.А., Кононенко В.И., Шуравенко Н.А.// ТВТ. 1996. Т. 34, № 2, С. 234.
- [6] Новиков И.И., Филиппов Л.П. и др.// Атомная энергия. 1977. Т. 43, № 4, С. 300-302.

А.В. КУДИНОВ, Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. ГУБИН
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ

Методом молекулярной динамики с помощью программного пакета LAMMPS было проведено моделирование термического разложения водородосодержащих веществ на примере жидких водорода и метана. Взаимодействие между частицами в системе описывалось силовым потенциальным полем ReaxFF (2008) для водорода и ReaxFFlg для метана. Показаны зависимости изменения продуктов разложения от времени. Проведено сравнение с расчетом других авторов и термодинамическим равновесным расчетом с потенциалом взаимодействия Букингема вида Exp-6.

A.V. KUDINOV, YU.A. BOGDANOVA, S.A. GUBIN
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

MD SIMULATION OF THERMAL DECOMPOSITION OF HYDROGEN-CONTAINING SUBSTANCES

Thermal decomposition was simulated using the molecular dynamics method in LAMMPS software package. As test substance we used liquid hydrogen and methane. The interaction between particles in the system was described by the potential force field ReaxFF (2008) for hydrogen and ReaxFFlg for methane. We show the dependence of the decomposition products on time and provide a comparison with the calculations of other authors and thermodynamic equilibrium calculations with the Buckingham interaction potential Exp-6.

В настоящее время для моделирования термодинамических свойств различных веществ и физических процессов широко применяется компьютерное моделирование методом молекулярной динамики, который основан на численном решении классических уравнений движения частиц в некотором выделенном объеме среды. В данной работе для молекулярно-динамического моделирования использовался пакет LAMMPS [1]. В качестве потенциала взаимодействия был выбран потенциал ReaxFF (2008) [2] для водорода и ReaxFFlg [3] для метана. Особенностью этих потенциалов является возможность описания химических реакций. Расчет термического разложения водорода

проводился для NVT ансамбля с шагом интегрирования 0.1 фс в интервале температур 4000–20000 К. На рис. 1 показано относительное количество водорода в системе для различных значений температур.

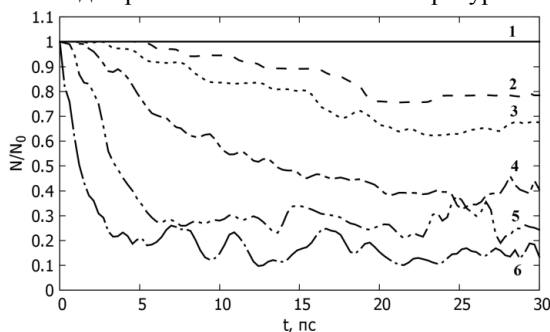


Рис. 1. Относительное содержание молекул водорода в зависимости от времени расчета: 1 – 4000 К, 2 – 8000 К, 3 – 10000 К, 4 – 12000 К, 6 – 16000 К, 7 – 20000 К.

Моделирование термического разложения метана также проводилось для NVT ансамбля при температуре 4000 К. На рис. 2 представлено изменение относительного количества молекул CH_4 , CH_3 и H_2 . Наблюдается резкий рост числа молекул CH_3 , достигающих максимума к 6 пс, одновременно с ростом молекул H_2 , продолжающимся на фоне убыли молекул CH_3 и CH_4 , содержание которых падает почти до нуля в конце расчета.

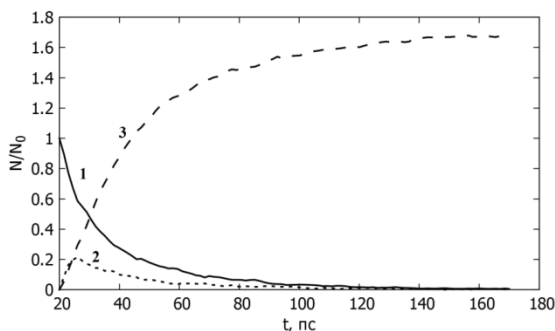


Рис. 2. Относительное количество молекул в системе: 1 – CH_4 , 2 – CH_3 , 3 – H_2 .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00188).

Список литературы

- [1] Sandia National Labs [сайт]. URL: http://lammps.sandia.gov/doc/Section_intro.html
- [2] Chenoweth K., van Duin A.C.T., et al. // J. Phys. Chem. A. 2008. V. 112. P. 1040–1053.
- [3] Liu L., Liu Y., Zybin S.V., and others // J. Phys. Chem. A. 2011. V. 115. P. 11016–11022.

А.И.САВВАТИМСКИЙ¹, С.В.ОНУФРИЕВ¹, С.А.МУБОЯДЖЯН²,
Г.Е. ВАЛЬЯНО¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Всероссийский институт авиационных материалов, Москва, Россия

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОГО
ТУГОПЛАВКОГО КАРБИДА ПРИ БЫСТРОМ НАГРЕВЕ
ТОКОМ (2000 – 5000 К)**

Впервые измерены энтальпия, теплоемкость и теплота плавления карбида $Ta_{0.8}Hf_{0.2}C$ в диапазоне температур 2500-5000 К. Температура плавления (4300 К) в пределах погрешности измерений совпадает с данными для этого состава, полученными Андриевским с помощью модели черного тела в 1967 году. Наблюдается повышенная теплоемкость вблизи плавления твердого тела, вероятно связанная с образованием неравновесных дефектов при быстром нагреве.

A.I.SAVVATIMSKIY¹, S.V.ONUFRIEV¹, S.A.MUBOYADZHIAN²,
G.E. VAL'YANO¹

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Institute of aviation materials, Moscow, Russia

**THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE MOST
REFRACTORY CARBIDE UNDER FAST CURRENT HEATING
(2000-5000 K)**

The enthalpy, heat capacity, and heat of melting of $Ta_{0.8}Hf_{0.2}C$ carbide were measured for the first time in the temperature range of 2500–5000 K. The melting temperature (4300 K) within the measurement error coincides with the data for this composition obtained by Andrievsky using a blackbody model in 1967 year. An increased specific heat was observed near the melting of a solid, probably due to the formation of non-equilibrium defects under fast heating.

Импульсный нагрев лазером с поверхности позволяет исследовать уровень температур и состояние поверхности, тогда как импульсный нагрев током [1] позволяет исследовать удельные теплофизические и электрофизические свойства (электросопротивление, теплоемкость, введенную энергию). Например, при импульсном нагреве током в наших работах достоверно установлена температура плавления графита (4850 ± 50 К) и получены свойства графита от 2000 К до 5000 К, включая жидкую фазу, а также свойства карбида циркония в области плавления и в жидкой фазе.

Наблюдаемый крутой рост теплоемкости в узкой температурной зоне (за ≈ 400 К до плавления на рис.1) для исследованного карбида $Ta_{0.8}Hf_{0.2}C$, по-видимому, связан с образованием в твердой фазе нестационарных дефектов [2]. Насыщение карбида перед плавлением вакансиями диффузионным путем маловероятно из-за медленности процесса диффузии.

Согласно выполненному эксперименту нестационарные дефекты характеризуются «временем жизни» порядка 1 микросекунды. Подобный крутой рост теплоемкости при быстром нагреве может иметь место при взрывных и ударно-волновых нагружениях твердого тела, если достигается область плавления.

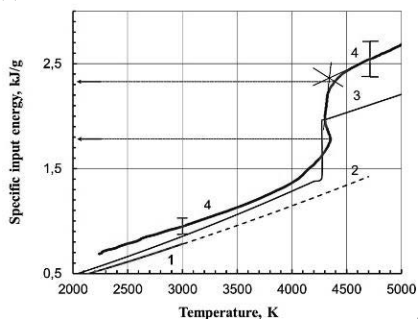


Рис.1. Зависимость энтальпии W карбида $Ta_{0.8}Hf_{0.2}C$ от температуры (жирная линия 4).
Остальные кривые – расчетные данные для TaC.
Температура плавления – 4300 К.

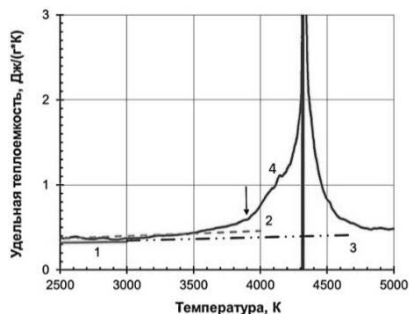


Рис.2. Теплоемкость карбида $Ta_{0.8}Hf_{0.2}C$ в области плавления и в жидкой фазе.
1,2,3 – расчетные данные для TaC (без учета фазового перехода); 4 - импульсный эксперимент.

На рис.2 стрелка указывает начало крутого роста теплоемкости. Описание температурных измерений при импульсном нагреве приведено в [3].

Работа выполнена при финансировании РНФ за 2017 год (грант № 17-19-01099).

Список литературы

- [1] А. И. Савватимский, С. В. Онуфриев. // Ядерная физика и инжиниринг, 2015, том 6, №11–12. С. 622–642.
- [2] А.И. Савватимский // Известия РАН. Серия физическая, 2018, том 82, № 4. С. 414–418.
- [3] S. V. Onufriev and A. I. Savvatimskiy. // TBT, 2018. T. 56, № 5, В печати.

Л.П. КУРУЛЕНКО, И.В. ЗАНЕГИН, И.В. ШИБЕРИН
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ АК-33 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Получены количественные характеристики механических свойств стали АК-33 в широком диапазоне напряженно-деформированного состояния: от статического деформирования до высокоинтенсивного ударно-волнового нагружения. В процессе работы проводились исследования скорости распространения ультразвуковых волн и расчет динамических упругих характеристик стали АК-33, поведение стали при статических, динамических и ударно-волновых нагружениях.

A.P. KURULENKO, I.V. ZANEGIN, I.V. Shiberin
*Sarov of Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear
University MEPhI, Sarov, Russia*

DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AK-33 STRUCTURAL STEEL UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

Obtaining quantitative characteristics of the mechanical properties of AK-33 steel in a wide range of stress-strain state: from static deformation to high-intensity shock-wave loading.

In the course of the work, the propagation velocity of ultrasonic waves and the calculation of the dynamic elastic characteristics of AK-33 steel were carried out, and the behavior of the steel under static, dynamic and shock-wave loads.

Разработка ряда конструкций в РФЯЦ-ВНИИЭФ, эксплуатация которых сопряжена со статическими и/или динамическими нагрузками, требует комплексного подхода к определению прочностных свойств материалов, входящих в их состав. Такие данные необходимы для построения моделей поведения материалов и совершенствования численных методик, применяемых в расчетах на надежность взрывозащитных камер, контейнеров для транспортировки радиоактивных веществ и т.п. Для большинства вновь предложенных материалов данные по прочностным свойствам либо отсутствуют, либо имеются в недостаточном для практического использования объеме.

На экспериментальной базе СарФТИ НИЯУ МИФИ и РФЯЦ-ВНИИЭФ проведены исследования легированной стали АК-33, направленные на получение её прочностных характеристик в широком диапазоне напряженно-

деформированного состояния от статического деформирования, до высокоинтенсивного ударно-волнового нагружения. Эти данные необходимы для построения расчетной модели стали АК-33, предложенной взамен стали 12Х18Н10Т в качестве материала для изготовления корпусов капсул сохранения.

По σ - ϵ диаграммам, полученным в опытах на статическое деформирование при растяжении и сжатии, определены пределы текучести и пределы прочности материала. Определено, что при растяжении и скоростях деформации от 0.33×10^{-4} до $0.33 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ у стали АК-33 предел текучести $\sigma_{0,2} \approx 750 \text{ МПа}$, а предел прочности $\sigma_b \approx 790 \text{ МПа}$, что говорит о слабом отличие $\sigma_{0,2}$ и σ_b .

По результатам опытов, по методу составных стержней Гопкинсона, в диапазоне скоростей деформации 1.8×10^3 до $3.8 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ величина предела текучести для стали АК-33 практически не изменяется и составляет $\approx 1005 \text{ МПа}$.

Поведение стали АК-33 при динамическом нагружении исследовалось в опытах по регистрации откольного разрушения в диапазоне давлений $30 \div 50 \text{ ГПа}$. По результатам проведенных экспериментов получено значение откольной прочности стали АК-33, которое в диапазоне давлений $30 \div 50 \text{ ГПа}$ составляет $\sim 4 \text{ ГПа}$, что незначительно выше величины откольной прочности легированной стали 12Х18Н10Т ($\sim 3,6 \text{ ГПа}$).

В диапазоне скоростей деформации $3,5 \div 9,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ величина динамического предела текучести образцов из стали АК-33 составила $\approx 1234 \text{ МПа}$.

Список литературы

- [1] Исследование сдвиговой прочности стали 12Х18Н10Т методом негидродинамического затухания с использованием манганиновых датчиков. IX Харитоновские чтения под редакцией А.Л. Михайлова. Саров 2007 г. 484 с.
- [2] Прочность и ударные волны. Сборник научных трудов под редакцией академика РАЕН, Новикова С.А. Саров 1996 г.

Л.И. ЛИПЕНКОВА

Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ГЕКСОГЕНА-ТТ, ПОЛУЧЕННОГО
ПУТЕМ ТЕРМОВАКУУМНОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ,
НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВС
НА ЕГО ОСНОВЕ**

Установлена зависимость детонационной способности взрывчатой смеси (ВС) от дисперсности и кристаллической структуры гексогена-ТТ. Определен вклад процесса переработки ВС на структуру гексогена-ТТ и детонационную способность ВС.

L.I. LIPENKOVA

SarFTI NRNU MEPhI, Sarov, Russia

**THE EFFECT OF THE STRUCTURE OF RDX-TT, OBTAINED
BY THERMAL RECRYSTALLIZATION, GAS-DYNAMIC
PROPERTIES OF EXPLOSIVES BASED ON IT**

The dependence of the detonation ability of explosives on the dispersion and crystal structure of hexogen-TT. The contribution of the process of processing explosives on the structure of hexogen-TT and detonation ability of explosives.

Результаты последних исследований показывают, что детонационная способность ВВ-ТТ существенно зависит от кристаллической структуры, формирование которой определяется технологическими условиями процесса термовакuumной перекристаллизации. Использование наполнителя оптимальной дисперсности может стать дополнительным источником повышения детонационной способности ВС на основе ВВ-ТТ. Совокупность имеющейся информации свидетельствует, что именно кристаллическая структура гексогена определяет детонационную способность ВС на его основе. Данные процесса переработки ВС на основе гексогена-ТТ представляют не только практический интерес, с точки зрения оптимизации структуры и повышения детонационной способности ВС, но и чисто научный, поскольку знание истинной структуры состава является необходимым условием для его описания в рамках существующих моделей кинетики детонации [1] для использования в численных расчетах специзделий.

К настоящему моменту времени установлены технологические условия получения гексогена-ТТ различных кристаллических модификаций, различающихся по детонационной способности в составах.

В результате проведенных исследований установлено, что детонационная способность ВС на основе гексогена-ТТ главным образом зависит от реакционной способности частиц наполнителя, то есть от дефектности их кристаллической структуры. Увеличение удельной поверхности частиц наполнителя приводит к немонокотному изменению детонационной способности ВС. Высокая дефектность кристаллической структуры более эффективно повышает детонационную способность ВС, чем увеличение удельной поверхности частиц. Контактные границы раздела частиц гексогена-ТТ вносят наименьший вклад в повышение детонационной способности ВС.

Список литературы

- [1] Кузьмицкий И.В. // Экспериментальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Труды международной конференции IX Харитоновские тематические научные чтения / Под ред. А.Л.Михайлова. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.

Ю.А. БОГДАНОВА, И.В. МАКЛАШОВА, У.Д. ВАГИНА,
Т.Д. ТРЕТЬЯКОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ГЕЛИЯ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

В работе представлено моделирование ударно-волнового сжатия жидкого гелия. Показано, что учет возможной ионизации при высоких степенях сжатия повышает точность предсказания свойств гелия.

Y.A. BOGDANOVA, I.V. MAKLASHOVA, U.D. VAGINA,
T.D. TRETYAKOVA

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

MODELING OF THE PROPERTIES OF HELIUM AT THE HIGH-PRESSURE

The paper presents a simulation of shock wave compression of liquid helium. It is shown that considering the possible ionization at high compression rates increases the accuracy of the prediction of helium properties.

Проведено термодинамическое моделирование поведения гелия при изотермическом и ударно-волновом сжатии. Для описания термодинамических свойств флюидных (газообразных сверхкритических) веществ в коде TDS [1] используется теоретическая модель уравнения состояния (УРС) газовой (флюидной) фазы на базе межмолекулярных потенциалов. Предполагается, что молекулы, атомы и ионы i и j продуктов взаимодействуют друг с другом в соответствии со сферически симметричными потенциалами Букингема Exp-6.

Параметры потенциала взаимодействия атомов Не определены из условия наилучшего согласия результатов термодинамического моделирования свойств изотермического сжатия с экспериментальными данными.

В качестве калорического УРС использовалась база данных ИВТАНТЕРМО.

В исходном состоянии до ударно-волнового воздействия гелий предварительно сжат и находится в жидком состоянии с заданной плотностью. В результате ударного сжатия жидкий гелий разогревается и может ионизироваться с образованием ионов He^+ и электронов.

Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [2, 3, 4] с различным значением начальной плотности жидкого гелия. Расчет проведен в двух вариантах: без учета

ионизации и с учетом образования ионов He^+ и электронов. На рис. 1 показаны результаты термодинамического моделирования адиабаты Гюгоннио для двух значений начальной плотности жидкого гелия $0,123 \text{ г/см}^3$ и $0,22 \text{ г/см}^3$ в сравнении с экспериментальными данными [2] – начальная плотность $0,123 \text{ г/см}^3$, [3] – начальная плотность $0,22 \text{ г/см}^3$. Расчетные данные показаны линиями, пунктирные линии соответствуют расчетам без учета ионизации, а сплошные линии соответствуют расчетам с учетом ионизации, экспериментальные – маркерами. Из рис. 1 видно, что учет возможной ионизации гелия при высоких степенях сжатия повышает точность предсказания свойств гелия за фронтом ударной волны.

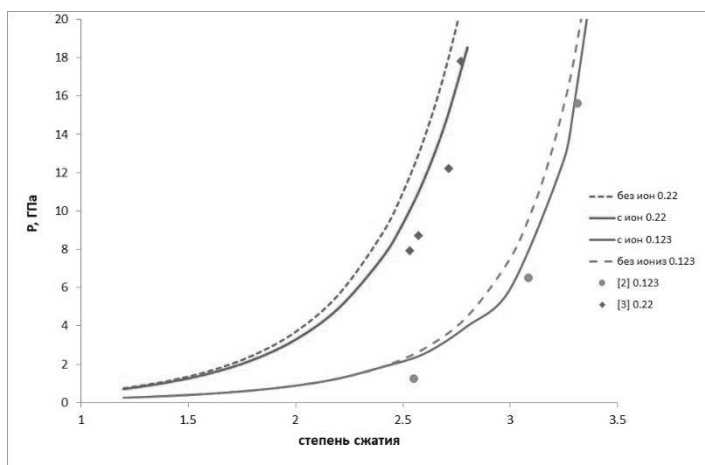


Рис. 1. Адиабата Гюгоннио гелия:– расчетные линии: пунктирные – без диссоциации, сплошные – с учетом ионизации, маркеры – экспериментальные данные [2, 3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00188).

Список литературы

- [1] S.B. Victorov, S.A. Gubin, I.V. Maklashova, I.I. Revyakin // Proc. 32nd Int. Annual Conference of ICT. Energetic Materials, Ignition, Combustion and Detonation. 2001, 69/1.
- [2] W. J. Nellis, N. C. Holmes, A. C. Mitchell, R. J. Trainor, G. K. Governo, M. Ross, and D. A. Young // Phys. Rev. Lett. 1984. 53, 1248.
- [3] C. T. Seagle, W. D. Reinhart, A. J. Lopez, R. J. Hickman, T. F. Thornhill. // Journal of Applied Physics. 2016, 120, 125902.
- [4] J. Zheng, Q. F. Chen, Y.J. Gu, J.T. Li, Z.G. Li, C.J. Li, Z.Y. Chen // Phys. Rev. B 2017, 95, 224104.

А.Ю МАЛАХОВ.¹, И.В. САЙКОВ¹, И.В. ДЕНИСОВ¹, Б.А
РОМАНЦЕВ.², Ю.В ГАМИН.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии
наук, Черноголовка

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС», Москва

ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ И ТРУБ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ И ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКОЙ

Приведены результаты экспериментов по взрывному плакированию стержней из стали 20 слоем коррозионностойкой стали 08Х18Н10Т. Установлена зависимость влияния атмосферы в сварочном зазоре (He, воздух) на морфологию границы соединения. Методом горячей пластической деформации изготовлены опытные образцы биметаллических труб и прутков. Результаты испытания на прочность сцепления слоев биметаллических труб показали отсутствие расслоения в их поперечном сечении.

A.YU. MALAKHOV.¹, I.V. SAIKOV.¹, I.V. DENISOV.¹ B.A.
ROMANTSEV.², YU.V GAMIN.²

¹Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian
Academy of Sciences, Chernogolovka

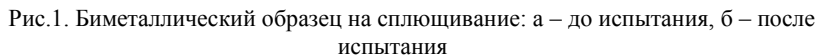
²National University of Science and Technology MISIS, Moscow

PRODUCTION OF BIMETALLIC RODS AND TUBES BY EXPLOSIVE WELDING AND HOT ROLLING

The results of experiments on explosive cladding of steel rods with 20 layer of corrosion-resistant steel 08H18N10T are presented. The dependence of the influence of the atmosphere in the welding gap (He, air) on the morphology of the junction boundary is established. The experimental samples of bimetallic pipes and rods were made by the method of hot plastic deformation. The results of the bond strength test of bimetallic pipe layers showed no delamination in their cross-section.

Одной из ключевых задач повышения коррозионно-эрозионной стойкости труб различного назначения является разработка оптимальных технологий нанесения на рабочую поверхность коррозионностойкого слоя из хромоникелевых сталей с обеспечением равнопрочного соединения слоёв. Одним из способов получения двухслойных труб, обеспечивающим

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по взрывному плакированию стержней из стали 20 диаметром 20 мм слоем из коррозионностойкой стали 08X18H10T толщиной 2,0 и 5,0 мм. Согласно схемам эксперимента, зазор в нескольких цилиндрических образцах заполнялся инертным газом для установления влияния атмосферы сварочном зазоре на структуру границы соединения. Исходя из геометрических размеров заготовок были рассчитаны параметры режимов сварки взрывом и проведены эксперименты по получению двухслойных сплошных цилиндрических заготовок длиной 800 и 1470 мм. Проведенный ультразвуковой контроль сплошности соединения и визуально-измерительный контроль поверхности показали, что используемые режимы сварки взрывом обеспечили практически 100%-ую сплошность слоев, что очень важно при использовании полученных заготовок для дальнейшей горячей пластической деформации. Далее из середины двухслойных стержней были отобраны образцы длиной 250 мм и проводилась их горячая деформация на прошивном стане с целью получения биметаллической трубы. После проведения операций по горячему деформированию исследовалось качество сцепления слоев по методу сплющивания кольцевого образца до соприкосновения сторон (рис. 1). Трещин и расслоения в поперечном сечении трубы обнаружено не было, что говорит о прочном соединении сваренных слоев.



304

З.И. МАМЕДОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ НА ОСНОВЕ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВ

Проведено исследование влияния параметров потенциала взаимодействия между молекулами на точность результатов расчетов термодинамических параметров двухкомпонентной системы He-H₂, полученных с использованием модели эффективного однокомпонентного флюида Ван дер Ваальса, для различных температур и концентраций компонентов.

Z.I. MAMEDOV

National research nuclear university MEPhI, Moscow, Russia

INFLUENCE OF POTENTIAL PARAMETERS OF COMPONENTS ON ACCURACY OF CALCULATIONS BASED ON THE MONTE CARLO SIMULATION DEPENDING ON THE TEMPERATURE AND CONCENTRATION OF SUBSTANCES

The influence of the parameters of the interaction potential between molecules on the accuracy of the results of calculations of the thermodynamic parameters of the two-component He-H₂ system, obtained using the effective van der Waals single-component fluid model, was studied for different temperatures and concentrations of components.

Для описания многокомпонентных систем широко используется модель Ван дер Ваальса эффективного однокомпонентного флюида (vdW1f) [1], свойства которого могут быть рассчитаны с помощью уравнения состояния однокомпонентного флюида. В настоящей работе проведено исследование влияния параметров потенциала взаимодействия между молекулами на точность рассчитываемых термодинамических параметров модельной двухкомпонентной смеси H₂-He. Для описания взаимодействия между молекулами используется сферически-симметричный потенциал Букингема Exp-6:

$$\phi_{ij}(r) = \frac{\varepsilon_{ij}}{\alpha_{ij} - 6} \left(6 \exp \left[\alpha_{ij} \left(1 - \frac{r}{r_{m,ij}} \right) \right] - \alpha_{ij} \left(\frac{r_{m,ij}}{r} \right)^6 \right), r \geq r_{c,ij} \quad \phi_{ij}(r) = +\infty, r \leq r_{c,ij},$$

где $\varepsilon_{ij} > 0$ – глубина потенциальной ямы; $r_{m,ij}$ – расстояние между центрами молекул, при котором потенциальная энергия минимальна; α_{ij} – параметр, определяющий жесткость отталкивания молекул. Потенциальные параметры H_2 заимствованы из [1], а параметры He варьировались для исследования точности модели vdWlf в сравнении с результатами расчетов бинарной смеси. Параметры перекрестного взаимодействия рассчитаны по правилу Лоренца-Берфелотта [2].

Результаты расчетов представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Статистика отклонений результатов расчетов давления и внутренней энергии в зависимости от потенциальных параметров компонентов для $T = 1000$ K

$\frac{\alpha_{He}}{\alpha_{H2}}$	$\delta p, \%$	$\delta U, \%$	$\frac{\varepsilon_{He}}{\varepsilon_{H2}}$	$\delta p, \%$	$\delta U, \%$	$\frac{r_{He}^*}{r_{H2}^*}$	$\delta p, \%$	$\delta U, \%$
1.08	0.56	2.05	0.29	1.98	0.83	0.44	2.02	11.19
1.17	1.24	0.08	0.55	1.01	1.12	0.87	1.98	0.83
1.23	1.98	0.83	0.82	0.71	0.19	1.17	3.13	0.89
1.35	3.53	2.31	1.65	6.40	6.45	1.46	9.09	7.65
1.80	7.58	4.81	2.47	11.74	13.47	1.75	11.93	11.82
2.70	8.74	2.29	4.12	21.41	29.29	2.33	12.39	12.80

Таблица 2. Статистика отклонений результатов расчетов давления и внутренней энергии в зависимости от потенциальных параметров компонентов для $T = 7000$ K

$\frac{\alpha_{He}}{\alpha_{H2}}$	$\delta p, \%$	$\delta U, \%$	$\frac{\varepsilon_{He}}{\varepsilon_{H2}}$	$\delta p, \%$	$\delta U, \%$	$\frac{r_{He}^*}{r_{H2}^*}$	$\delta p, \%$	$\delta U, \%$
1.08	2.02	1.46	0.29	2.65	0.21	0.44	2.08	3.23
1.17	2.59	0.03	0.55	1.03	1.62	0.87	2.65	0.21
1.23	2.65	0.21	0.82	4.27	3.72	1.17	6.58	2.75
1.35	3.48	1.70	1.65	12.32	10.85	1.46	12.07	8.09
1.80	10.43	6.10	2.47	19.17	17.42	1.75	16.87	12.46
2.70	13.23	0.99	4.12	30.74	29.43	2.33	18.11	14.25

Из расчетов следует, что модель эффективного однокомпонентного флюида не применима при расчете термодинамических параметров бинарных смесей с сильно различающимися энергетическими потенциальными параметрами компонентов.

Список литературы

- [1] Ree F.H. // J. Chem. Phys. 1983. Vol. 78. No. 1. P. 409
- [2] Додж Б. Ф. Химическая термодинамика в применении к химическим процессам и химической технологии. Москва: Изд-во иностр. лит., 1950 . 786 с.

А.С. МАРТЫНЕНКО, И.Ю. СКОБЕЛЕВ, С.А. ПИКУЗ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОНКИХ ФОЛЫГ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ЕЁ РАЗЛЁТА

Был рассмотрен подход, позволяющий по интегральным по времени и пространству эмиссионным рентгеновским спектрам лазерной плазмы установить параметры мишени в момент прихода основного импульса, что, как следствие, позволяет также дать оценку качества лазерного контраста. Выбранный подход основан на анализе профилей спектральных линий H- и He-подобных ионов Al и позволяет избежать необходимости проведения нестационарного моделирования.

A.S. MARTYNENKO, I.Yu. SKOBELEB, S.A. PIKUZ

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

INITIAL STAGES OF PLASMA EXPANSION OF THIN FOIL TARGETS IRRADIATED BY HIGH-POWER LASER

An approach of analysis of integral in space and time x-ray emission spectra of laser plasma was considered allowing to estimate initial target plasma parameters at the moment of main high-power laser pulse arriving, which also makes it possible to estimate the quality of a laser contrast. The approach is based on the analysis of the spectral line profiles of H- and He-like Al ions and avoids the necessity for non-stationary modelling usage.

Изучение взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом было и остаётся одной из ключевых тем исследований в области лазерной физики на протяжении более полувека. В этих экспериментах возникает проблема определения плотности плазмы, генерируемой в области взаимодействия основного лазерного импульса с веществом [1]. Причём это невозможно сделать напрямую с помощью традиционных рентгенодиагностических методов из-за отсутствия необходимого разрешения по времени. В наших исследованиях мы предлагаем подход [2], который позволяет использовать H- и He-подобные спектральные линии интегрированных во времени и пространстве рентгеновских спектров излучения многозарядных ионов лазерной плазмы для оценки параметров мишени во время прихода основного лазерного импульса.

Оценка параметров плазмы помимо информации о состоянии мишени также может дать нам возможность ответить на вопрос, была ли разрушена мишень предимпульсом, и каково качество лазерного контраста

Расчёт был выполнен с использованием кинетического кода и был основан на учёте относительных «весов» различных стадий расширения плазмы. Результаты показали необязательность использования нестационарного моделирования в расчетах (в предположении общего случая адиабатического характера расширения плазмы). Он также дал нам информацию о влиянии поздних стадий расширения и позволил нам оценить роль типа расширения плазмы. Несмотря на простоту и в некотором роде универсальность этого метода, существует ряд серьезных ограничений и необходимых предположений. Тем не менее он может быть использован для анализа результатов экспериментов с так называемыми мишенями с ограниченной массой, например, нанофольгами [3] и тонкими проволоками [4]; а также для оценки лазерного контраста.

Список литературы

- [1] Skobelev, I. Y., Ryazantsev, S. N., Arich, D. D. and others// Phot. Res. 2018. Vol. 6, № 4, P. 234.
- [2] A. S. Martynenko, I. Y. Skobelev, and S. A. Pikuz// Appl. Phys. B. 2019. Vol. 125
- [3] Colgan, J., Abdallah, J., Faenov, A. Y. and others// Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110. P. 125001
- [4] Schonlein, A., Boutoux, G., Pikuz, S. and others// EPL. 2016. Vol. 114. P. 45002.

И.Н. МЕЛЬНИКОВ¹, К.А. МОНОГАРОВ², А.Н. ПИВКИНА²
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
ИХФ РАН им. Н.Н. Семенова, Москва, Россия

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ОТРАБОТАВШИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ПЛОТНЫХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

Разработана трехмерная нестационарная тепловая модель пиротехнического устройства для разрушения деталей отработавших космических аппаратов из тугоплавких материалов на стадии их неконтролируемого падения в плотных слоях атмосферы. Модель позволяет рассчитать момент срабатывания пиротехнического устройства и оценить степень его воздействия на целевой материал в зависимости от геометрии устройства и условий теплового нагружения. Сопоставление результатов моделирования с лабораторными экспериментами подтвердило корректность разработанной модели.

I.N. MELNIKOV¹, K.A. MONOGAROV², A.N. PIVKINA²
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russia

THERMAL MODEL OF PYROTECHNICAL DEVICE FOR DESTRUCTION OF DETAILS COMPLETED SPACE APPARATUS IN DENSE ATMOSPHERE LAYERS

A three-dimensional non-stationary thermal model of a pyrotechnic device has been developed for the destruction of parts from spacecraft made of refractory materials at the stage of their uncontrolled fall in dense layers of the atmosphere. The model allows to calculate the response time of the pyrotechnic device and estimate the degree of its impact on the material, depending on the geometry of the device and the conditions of thermal loading. Comparison of simulation results with laboratory experiments confirmed the correctness of the developed model.

В настоящее время к космическим аппаратам предъявляют строгие требования по минимизации образования космического мусора и предотвращению падения их деталей на Землю. Поэтому уже на этапе проектирования новых космических аппаратов необходимо учитывать условия их безопасного вывода из эксплуатации. Особого внимания заслуживают топливные баки спутниковых аппаратов, изготавливаемые

из титановых сплавов, которые не разрушаются при падении в плотных слоях атмосферы. Одним из путей решения указанной проблемы могут служить пиротехнические устройства (ПУ), срабатывание которых является источником дополнительной тепловой энергии, обеспечивающей разрушение сплавов при аэродинамическом нагреве во время прохождения плотных слоев атмосферы.

Для демонстрации этой возможности разработана трехмерная термическая модель ПУ в программной среде ANSYS CFX. Устройство состоит из цилиндрической капсулы, внутри которой располагаются теплоизоляционный слой и пиротехнический состав (ПС) $Al/Co_3O_4/Na_2SiO_3$ в форме прессованной таблетки, детали представлены в работе [1]. Слой теплоизоляции предотвращает преждевременное срабатывание ПУ и, за счет упругости, обеспечивает надежный тепловой контакт между ПС и конструкционным материалом. Предполагается, что ПУ располагается на внешней поверхности бака, поэтому в модели рассматривается его фрагмент – целевая пластина. В работе рассматривается несколько способов крепления ПУ к пластине: точечная сварка, фиксация проволоочной сеткой, фиксация ремнем. Материал целевой пластины, капсулы и все крепежных элементов – титановый сплав ВТ6.

Математическая часть модели описывается нестационарным уравнением теплопроводности с источником тепловой энергии [2]. Роль источника выполняет ПС, характеризуемый функцией энерговыделения. На торцевую поверхность капсулы и внешнюю часть бака воздействует тепловой поток от аэродинамического нагрева в плотных слоях атмосферы.

В результате моделирования для различных вариантов крепления ПУ получены следующие параметры: время воспламенения ПС, оптимальные размеры ПУ для гарантированного разрушения конструкционного материала, размер области расплавления целевой пластины.

Корректность разработанной модели проверена в лабораторных испытаниях, в которых нагрев целевой пластины с установленным на ней ПУ осуществлялся воздействием лазерного излучения, а при срабатывании ПУ обеспечивалось дополнительное тепловое воздействие энергии сгорания ПС на целевую пластину.

Список литературы

- [1] Monogarov K.A., Pivkina A.N. et al. // Acta Astronautica Vol.135, P.69-75.
- [2] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: Учеб. пособие. – 6-е изд. М.: МГУ, 1999.

Д.С. НОСУЛЕНКО, Д.А. ВИХЛЯЕВ, Д.С. ГАВРИЛОВ,
К.В. САФРОНОВ, А.С. ТИЩЕНКО, П.А. ТОЛСТОУХОВ
*Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский НИИ технической
физики имени академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Снежинск, Россия*

ИЗМЕРЕНИЕ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ТАНТАЛОВЫХ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Измерены характеристики жесткого рентгеновского излучения, возникающего при облучении танталовых мишеней фемтосекундными лазерными импульсами. Плотность потока энергии излучения на мишени менялась от 10^{19} до 10^{20} Вт/см². Определена конверсионная эффективность рентгеновского излучения в диапазоне 0,1-1 МэВ и размер источника рентгеновского излучения.

D.S. NOSULENKO, D.A. VIKHLYAEV, D.S. GAVRILOV,
K.V. SAFRONOV, A.S. TISHCHENKO, P.A. TOLSTOUKHOV
*Russian Federal Nuclear Center - All-Russia scientific research institute of technical
physics named after E.I. Zababakhin (RFNC-VNIITF), Snezhinsk, Russia*

MEASUREMENT OF HARD X-RAYS FROM TANTALUM TARGETS IRRADIATED WITH FEMTOSECOND LASER

The characteristics of hard X-ray radiation from Ta targets irradiated with femtosecond laser pulses have been measured. Focused intensity was varied from 10^{19} to 10^{20} W/cm². X-ray conversion efficiency in the 0.1-1 MeV spectral range and the size of the X-ray source are determined.

Плазма, образующаяся при взаимодействии лазерных импульсов релятивистской интенсивности с веществом, является источником быстрых электронов. При их движении через мишень возникает характеристическое K_{α} -излучение и тормозное рентгеновское излучение (РИ). Получаемый в результате источник излучений обладает малым размером (от десятков до сотен микрометров) и короткой длительностью (порядка длительности лазерного импульса). В литературе обсуждается применение таких источников для импульсной радиографии плотных объектов с высоким пространственным разрешением [1] и зондирования мишеней лазерного термоядерного синтеза [2].

Настоящая работа посвящена исследованию характеристик жесткого рентгеновского излучения танталовых мишеней, облучаемых лазерными

импульсами с энергией ~ 2 Дж и длительностью 26 фс. Размер фокального пятна лазерного излучения варьировался от 3 до 10 мкм. Плотность потока энергии лазерного излучения на мишени менялась от 10^{19} до 10^{20} Вт/см².

Жесткое РИ с энергией квантов свыше 100 кэВ измерялось трехканальным спектрометром на основе фотоумножителей [3]. Для исследования выхода РИ из лазерных мишеней было проведено три серии экспериментов, которые различались расположением спектрометра относительно оси лазерного излучения.

Пространственное распределение интенсивности рентгеновского излучения несимметрично и имеет вид близкий к распределению РИ высоковольтных (напряжение несколько МВ) рентгеновских трубок с прострельным анодом.

Рентгеновский спектр лазерной плазмы в ограниченном диапазоне энергий может быть аппроксимирован экспонентой: $dE/d\varepsilon = \alpha \cdot \exp(-\varepsilon/T)$, где α – нормировочный коэффициент, T – температура спектра. Параметры спектра определялись следующим образом. Сначала для различных значений T и α моделировались сигналы детекторов. Затем выбирался спектр, для которого разница между экспериментально полученным и промоделированным сигналом наименьшая. В результате вычислений было определено, что температура спектра не зависит от направления наблюдения и составляет $T = 1,1 \pm 0,2$ МэВ. Из полученных спектров был определен коэффициент конверсии лазерного излучения в рентгеновское с энергией квантов в диапазоне 0,1-1 МэВ: $\eta = (1,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ ср}^{-1} \text{ Дж}^{-1}$.

Еще одной целью проведенных экспериментов было измерение размеров источника РИ. Для этого использовалась радиохромная пленка Gafchromic MD-55-2. Она закреплялась на тыльной стороне танталовых мишеней. Определение размера источника проводилось путем сравнения профиля изображений на RCF-пленке с формами распределений флюенса квантов, полученных численным расчетом для источников разных размеров. Результаты обработки полученных данных показывают, что размер источника РИ составляет $1,4 \pm 0,3$ мм.

Список литературы

- [1] F. Brunel. // Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 52.
- [2] S. C. Wilksetal. // Phys. Rev. Lett., 1992, 69, 1383.
- [3] П.А. Толстоухов и др. // Физика плазмы, 2011, 37, №8, 1–6.

Е.В. ПЕТРОВ, И.В. САЙКОВ

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова
Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ВЫСОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОТОКОМ ЧАСТИЦ

Исследованы структурные и фазовые превращения в приповерхностном слое металлических материалов после высокоэнергетической обработки потоком частиц. Показано, что в структуре стали образуется высокоуглеродистый аустенит, который при охлаждении стабилизируется растворенным вольфрамом, и формируется сетчатая ячеистая структура.

E.V. PETROV, I.V. SAIKOV

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian
Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

INVESTIGATION OF MATERIALS AFTER HIGH-ENERGY TREATMENT BY A FLOW OF PARTICLES

Structural and phase transformations in the near-surface layer of metal materials after high-energy treatment by particle flow are investigated. It is shown that high-carbon austenite is formed in the steel structure, which is stabilized by dissolved tungsten during cooling, and a mesh cellular structure is formed.

Исследования структурных и фазовых превращений металлических материалов под воздействием потока высокоэнергетических микрочастиц – важная задача физического материаловедения. При соударении потока частиц различной дисперсности, разогнанного энергией взрыва до скорости 1-3 км/с, с поверхностью, их материал может проникать в преграду на глубину, превышающую размер исходных частиц в сотни раз и воздействует на структуру материала исследуемого образца. Этот эффект был обнаружен при проведении исследований по упрочнению металлов с помощью ударно-волнового воздействия [1]. Взаимодействие потока частиц с образцом приводит к остановке наибольшей их части в приповерхностной зоне и образованию на его поверхности покрытия из частиц. Ударно-волновое нагружение и воздействие высокоскоростных частиц обеспечивают улучшение физико-механических свойств, как

поверхности, так и всего объема обрабатываемых материалов. Несмотря на то, что природа данного эффекта до сих пор не установлена [2], методика исследования позволяет достаточно близко симулировать процессы воздействия космического мусора на летательные аппараты в космическом пространстве.

Целью настоящей работы является исследование структурных и фазовых превращений в материалах после высокоэнергетической обработки потоком частиц. В качестве стальной преграды выбраны образцы из конструкционной стали марки Ст.3 диаметром 20 мм и высотой 30 мм, форма образцов обуславливалась удобством проведения экспериментов. В качестве материала порошка выступал порошок вольфрама, с размером частиц 10–16 мкм. Схема проведения эксперимента была следующей: цилиндрический образец помещался в направляющий канал, сверху которого располагалось кольцо с порошком насыпной плотностью массой 3 г. На кольцо устанавливался заряд взрывчатого вещества насыпного гексогена с детонатором. При детонации ударная волна и продукты взрыва разгоняли порошок и вместе с ним воздействовали на исследуемый образец. Схема эксперимента для соударения высокоскоростного потока частиц со стальной преградой представлена в [3]. При исследовании поперечного сечения поверхности стального образца показано, что после воздействия потока частиц вольфрама на поверхности происходит формирование покрытия толщиной от 10 мкм до 50 мкм и образование переходной зоны. При исследовании границы раздела образца и покрытия с помощью электронного микроскопа были обнаружены переходные зоны, состоящие из частиц вольфрама, железа и их интерметаллидного соединения. При ударном воздействии частиц порошка вольфрама со сталью Ст.3 выделяется максимальное количество энергии, которое переводит систему в метастабильное состояние. Температура в активной зоне превышает уровень температуры перитектоидной реакции в 1060°C в системе Fe-W. Как следствие, в структуре стали образуется ячеистый переохлажденный аустенит с сеткой карбида вольфрама по границам зерен, что идентично структуре литой быстрорежущей стали со сложной карбидной эвтектикой.

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] Роман О.В. и др. // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. № 4. С. 187-199.
- [3] Кирсанов Р.Г., Петров Е.В. и др // Деформация и разрушение материалов. 2010. №6. С.43.

Д.С. ПЛАКСИНА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ

Рассмотрены изменения, происходящие с резервуаром при горении и тушении во времени. Проведена оценка скорости нагрева стенки резервуара от времени, а также последующее изменение скорости остывания стенки резервуара от времени после запуска установки пожаротушения.

D.S. PLAKSINA

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

MODERN METHODS FOR THE RESEARCH OF BURNING AND EXTINGUISHING TANKS

The changes occurring during the combustion and extinguishing of the oil tank depending on the time are considered. The estimation of the heating rate from the time of the tank wall, the evaluation of the change in the cooling rate of the tank wall from the time after the start of the fire extinguishing installation was evaluated.

При проведении исследований процессов горения резервуаров одной из важных проблем является изучение температурных изменений при горении и тушении резервуара. Измерение температуры контактными методами проблематично из-за нагревания стенки резервуаров до температур разрушающих контактные датчики, в процессе горения факел оказывает воздействие на контактные датчики, что приводит к их разрушению. Изучение стадий изменения температуры резервуара, связано с неравномерностью прогревания слоев горящего топлива и как следствие неравномерность прогрева стенки резервуара на начальной стадии.

Экспериментальные исследования проводились на макете резервуара РВС-20 000. Модельная установка и методика проведения эксперимента подробно описаны в работах [1-2].

В результате эксперимента получена серия фото- и видеоизображений процесса воспламенения, устойчивого горения и тушения резервуара, которые можно интерпретировать следующим образом (рис. 1).

Покадровое изображение представляет полную картину распределения температуры по всему борту резервуара, а также дает характеристику температуры продуктов горения.

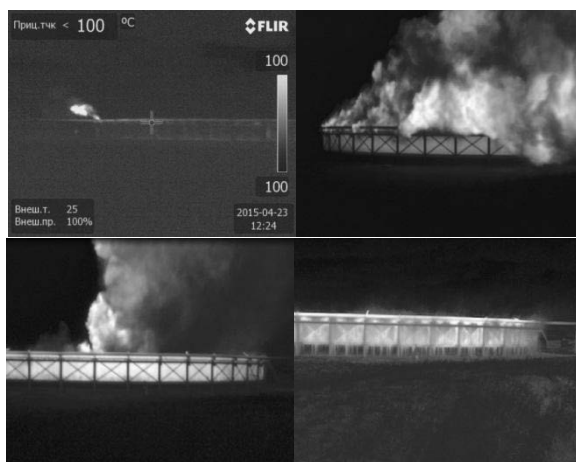


Рис. 1. Покадровое изображение процесса горения от момента поджига до включения системы орошения

Данные графические изображения позволяют описать характер изменений процесса выделяя: поджиг резервуара, устойчивое горение, включение установки пожаротушения, включение системы орошения.

На основе анализа графических изображений можно сделать выводы об эффективности предложенного способа пожаротушения, при анализе серий фото- и видео изображений натурного эксперимента не выявлено случаев повторного воспламенения. Провести оценку скорости тушения резервуаров и сравнить данный параметр с различными способами тушения резервуаров, как для установок российских, так и зарубежных производителей установок пожаротушения.

Список литературы

- [1] Копылов Н.П., Кузнецов А.Е., Родионов Е.С., Федоткин Д.В., Орлов Л.А., Плаксина Д.С., Сенчишак Т.И., Кононов Б.В. // Пожарная безопасность. 2016. №3. С. 85-93.
- [2] Копылов Н.П., Копылов С.Н., Забегаев В.И., Агафонов В.В., Кузнецов А.Е., Родионов Е.С., Кононов Б.В., Матвеев А.А., Милехин Ю.М., Сенчишак Т.И., Ерохин С.П., Федоткин Д.В., Орлов Л.А., Плаксина Д.С. // пат. 2616848 Рос. Федерация : МПК⁷ А62С 3/06 № 2015138357 ; заявл. 08.09.2015 ; опубл. 18.04.2017, Бюл. № 11. 6 с.

И.В. САЙКОВ, М.И. АЛЫМОВ, В.Г. ВАДЧЕНКО

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова
Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

ИНИЦИИРОВАНИЕ РЕАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ УДАРНО-ВОЛНОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Рассмотрены вопросы инициирования экзотермических реакций в многокомпонентных порошковых смесях при ударно-волновом нагружении. Экспериментально опробованы две схемы инициирования: в цилиндрических ампулах сохранения и метанием плоского ударника. Проведен предварительный термодинамический расчет. Исследован фазовый состав продуктов. Определено влияние активирующих добавок на процесс инициирования и полноту прохождения реакции.

I.V. SAIKOV, M.I. ALYMOV, S.G. VADCHENKO

*Merzhanov Institute of Structural Macrokineics and Materials Science Russian
Academy of Sciences (ISMAN), Chernogolovka, Russia*

THE INITIATION OF REACTIVE MATERIALS BY SHOCK WAVE

The problems of initiation of exothermic reactions in multicomponent powder mixtures under shock-wave loading are considered. Experimentally tested two schemes of initiation: in cylindrical recovery fixtures and by throwing flat drummer. A preliminary thermodynamic calculation was carried out. The phase composition of the products is investigated. The influence of activating additives to the process of initiation and completeness of the reaction was determined.

Реакционные материалы – это, как правило, порошковые смеси металлов, неметаллов и оксидов, способные к быстропотекающей экзотермической реакции с большим энерговыделением при интенсивном механическом воздействии [1]. Основным направлением в разработке рецептур реакционных материалов в России и за рубежом является исследование и поиск взаимосвязей между базовыми характеристиками: составом, дисперсностью, способом смешения, энерговыделением, температурой горения, скоростью и полнотой реакции, соотношением твердых, жидких и газообразных продуктов [2–5].

В работе представлен экспериментальный материал по исследованию горения металлофторопластовых композиций 62Ni-28Al-10ПТФЭ, 70Ti-

20В-10ПТФЭ, 75Нf-15В-10ПТФЭ. Предварительно был проведен оценочный термодинамический расчет адиабатической температуры горения, фазового состава и соотношения твердых, жидких и газообразных продуктов реакции [6]. При определении газовыделения использовали сферическую стеклянную колбу объемом 620 см³, снабженную иницирующей спиралью, термопарами для определения времени горения и датчиком давления. Для инициирования горения ударно-волновым воздействием была применена схема с плоской многоячейстой ампулой сохранения. В стальной матрице равноудаленно от центра выполнены глухие отверстия диаметром 10 мм для размещения исходных образцов в таблеток. Ударно-волновое нагружение осуществлялось за счет метания зарядом взрывчатого вещества стального ударника на поверхность матрицы и образцов. Конструкция обеспечивала одинаковые условия нагружения во всех ячейках.

Исследованные реакционные материалы обладают достаточно высокой адиабатической температурой горения: 2018 К, 3192 К и 2727 К для систем Ni-Al-ПТФЭ, Ti-B-ПТФЭ, и Hf-B-ПТФЭ соответственно. Для систем Ni-Al-ПТФЭ и Hf-B-ПТФЭ газовыделение продолжается некоторое время после окончания горения. В системе Ti-B-ПТФЭ время окончания газовыделения совпадает со временем окончания горения. Зависимость скорости горения образцов от их плотности не является универсальной. Для составов Hf-B-ПТФЭ и Ti-B-ПТФЭ скорость горения прямо пропорциональна плотности, для Ni-Al-ПТФЭ – скорость монотонно снижается при уплотнении исходных образцов.

Исследованные составы способны к интенсивной экзотермической реакции как при традиционном зажигании раскаленной спиралью, так и при ударно-волновом воздействии. Таким образом, они являются перспективными для применения в технике в качестве реакционных материалов.

Список литературы

- [1] Имховик Н.А. и др. // Вооружение и экономика. 2014. Vol. 26, № 1, P. 53–63.
- [2] Zhang S., Liu JX., Yang M., Wang L., Lan J., Li SK., He C., Xue XY. // Materials & Design. 2018. Vol. 153, P. 1–8.
- [3] Hunt EM, Malcolm S., Pantoya ML., Davis F. // International journal of impact engineering. 2009. Vol. 36, № 6, P. 842–846.
- [4] Alymov M.I., Vadchenko S.G., Gordopolova I.S., Saikov I.V., Milyukova I.V. // Inorganic Materials. 2018. Vol. 54, № 11, P. 1175–1182.
- [5] Saikov I.V., Alymov M.I., Vadchenko S.G. and Gulyaev P.Yu. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1115, P. 042012.
- [6] <http://www.ism.ac.ru/thermo/>

В. Г. САЛАМАТОВ ^{1,2}, А. И. КИРДЯШКИН ², Р. М. ГАББАСОВ ²

*1. Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, Россия*

*2. Научно-исследовательский Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН,
Томск, Россия*

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГОРЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ НИТЕЙ Ni-Al, Ti-Al и Cu-Al

Проведено исследование тепловых, структурных и эмиссионных характеристик горения металлических композитных нитей Ti-Al, Ni-Al, Cu-Al в аргоне, на воздухе и кислороде. Установлено, что кинетика горения контролируется капиллярным массопереносом в расплавах металлов. Обнаружены эффекты эмиссии неравновесной газовой плазмы и спонтанной электрической поляризации реакционной волны.

V. G. SALAMATOV ^{1,2}, A. I. KIRDYASHKIN ², R. M. GABASOV ²

*1. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, Russia*

2. Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk, Russia

FEATURES OF HIGH-TEMPERATURE COMBUSTION OF COMPOSITE FIBERS Ni-Al, Ti-Al and Cu-Al

Thermal, structural and emissive characteristics of the combustion of metal composite fibers Ti-Al, Ni-Al, Cu-Al in an argon and oxygen, and air media are studied. The kinetics of combustion is shown to be controlled by capillary mass transfer in metal melts. The effects of emission of nonequilibrium gas plasma and the spontaneous electric polarization of reaction wave are found.

Знание закономерностей горения металлосодержащих систем важно для решения актуальных проблем повышения энерговыделения и скорости сгорания композитных ракетных топлив за счет введения порошков и нитевидных металлов [1, 2], а также обусловлен применением металлосодержащих систем для синтеза горением новых материалов [3].

В настоящей работе проведено комплексное исследование тепловой, структурной и эмиссионной динамики проволочных композитов Ni-Al, Cu-Al, Ti-Al при горении в среде O₂, на воздухе и в Ar. Использовали проволоки чистотой не менее 99.5 мас.% основного вещества. Диаметр проволок - Ni, Cu - 0.3 мм, Al, Ti - 0.4 мм. Композиты готовили скручиванием проволок в соотношениях: Ni+(25÷30) вес % Al; Ti+(35÷40) % Al; Cu+(35÷40) % Al и закрепляли между электродами. Зажигание осуществлялось пропуском электрического тока через

образец до момента его плавления и разрыва в центральной части. Далее вдоль образца в направлениях к электродам распространялись две волны горения. Процессы контролировали скоростной видеосъемкой, методами спектрометрии, спектральной пирометрии и электродондового измерения плазмы. Установлено, что горение композитов протекает при полном плавлении исходных компонентов систем и продуктов реакции; реакционная волна представляет собой жидкую каплю, что подтверждается высокой величиной измеренной максимальной температуры горения – $2600 \div 5000$ К, где максимальное значение соответствует синтезу в кислороде. Внутри капли происходит интенсивное смешение расплавов исходных металлов, поступающих из проволок, распространение волны сопровождается специфическими эффектами.

Гидродинамические эффекты. Обработка данных видеозаписи показала, что скорость горения систем увеличивается с 0.15 до 0.9 м/с при переходе от инертной к окислительным средам. Высокие значения скоростей горения обусловлены капиллярной конвекцией расплавов в реакционной волне, что подтверждается наблюдением циркуляционных течений (до 2 м/с) жидкости (вихри, сеть упорядоченных ячеек-многогранников размером до 0,2 мм) на поверхности капель реагирующих расплавов. *Эмиссионные эффекты.* Горение композитов в Ag сопровождается равномерным испарением компонентов по всей поверхности капли. В окислительных средах испарение дополняется струйными выбросами из локальных участков реагирующей капли, где происходит кипение расплава. Струи паров сгорают, образуя облака взвеси дисперсных частиц (газо-пылевая фаза). Особенностью процесса формирования фазы является эффект закрутки струйных потоков вокруг капли, что свидетельствует о сильной электрической поляризации ($(2 \div 3) \cdot 10^3$ В) системы: капля-пылевая фаза. В ходе реакционных превращений наблюдаются атомные и молекулярные спектры Al, Ni, Al^+ , Cu, Ti, AlO, NiO, CuO и других частиц. Согласно электродондовым измерениям, электронная температура ионизированной газовой фазы достигает уровня $(1.5 \div 20) \cdot 10^4$ К.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-03-00081 А

Список литературы

- [1] Cavery L. H., Click R. L. // Spacecraft and Rockets 1967. Vol. 1, P. 79 – 85.
- [2] Andrzejak T A, Shafirovich E and Varma A 2007 Combustion and Flame 150 60
- [3] Levashova E. A. and others // J. Int. Mater. Rev. 2017, Vol. 62, P. 203 – 239

А.А.СЕЛЕЗЕНЕВ, Е.В.ГУСАРОВА, В.Ю.КОРОЛЕВ
*РФЯЦ Всероссийский Научно- Исследовательский Институт
Экспериментальной Физики, Саров*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАСПАДА МОЛЕКУЛ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Метод молекулярно-динамического моделирования использовался для определения кинетики распада молекул ряда энергетических материалов. Рассматривались материалы RDX, HMX, PETN, CL-20. МД моделирование разложения исходных молекул и образования конечных продуктов реакции проводилось в *NPT* ансамбле в области давлений и температур близких к детонационным.

A.A.SELEZENEV, E.V.GUSAROVA, V.U.KOROLEV
*Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute Of Experimental
Physics, Sarov*

RESEARCH OF THE MECHANISM OF DECOMPOSITION OF ENERGETIC MATERIALS MOLECULES WITH USE MOLECULAR DYNAMICS METHOD

The molecular dynamic method was used to determine kinetics of chemical reactions of decomposition of molecules of energetic materials. The RDX, HMX, PETN, CL-20 materials were considered. The MD simulation of decomposition of EM molecules and formation of reaction products was carried out at *NPT* ensemble at pressure and temperatures, which were near to detonation.

В работе представлены результаты тестирования и верификации межатомного силового поля ReaxFF-Ig, которое инкорпорировано в код LAMMPS и используется для моделирования свойств молекулярных кристаллов энергетических материалов (ЭМ). Верификация силового поля ReaxFF-Ig проводилась методом сопоставления расчетных и экспериментальных изотерм сжатия и адиабат Гюгонии ряда ЭМ. Результаты молекулярно-динамического (МД) моделирования показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных изотерм и адиабат Гюгонии для молекулярных кристаллов RDX, HMX, PETN, CL-20.

Кинетика распада молекул ЭМ при высокой температуре и давлении ($T > 1500$ К, $P > 10$ ГПа) изучалась методами МД моделирования в *NPT*

ансамбле. При построении расчетной ячейки для МД моделирования рассматривалась система с постоянным числом частиц N , с давлением P , находящаяся в термостате с температурой T (канонический ансамбль NPT). Для рассмотренных молекулярных кристаллов ЭМ определён механизм начальной стадии распада молекул, определена энергия активации в уравнении Аррениуса для скорости элементарных стадий образования промежуточных и конечных продуктов распада молекул. Определены зависимости скоростей элементарных стадий от величины температуры и давления.

Н.Н. СЕРЕДКИН^{1,2}, С.В. ОНУФРИЕВ¹, А.И. САВВАТИМСКИЙ¹,
Г.Е. ВАЛЬЯНО¹, С.А.МУБОЯДЖЯН³

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

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

³Всероссийский институт авиационных материалов (ВИАМ), Москва, Россия

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУГОПЛАВКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ (ZrC; ZrC+C) В ОБЛАСТИ ИХ ПЛАВЛЕНИЯ И ЖИДКОЙ ФАЗЫ (2000 – 5000 K)

Целью данной работы является экспериментальное исследование свойств тугоплавких проводящих веществ (карбиды циркония) в области плавления и жидкой фазе. В первую очередь, это относится к электронным свойствам – электросопротивлению, а также к тепловым свойствам (энтальпии, теплоемкости, тепловому расширению в зависимости от температуры).

N.N. SEREDKIN^{1,2}, S.V.ONUFRIEV¹, A.I.SAVVATIMSKIY¹,
G.E. VAL'YANO¹ , S.A.MUBOYADZHYAN³

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

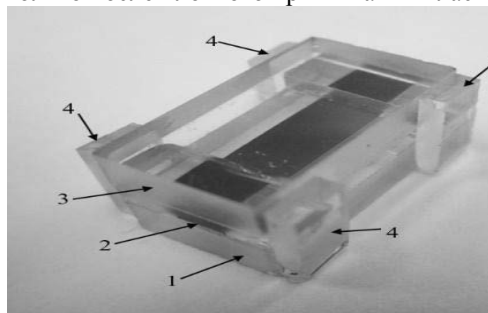
³Institute of aviation materials (VIAM), Moscow, Russia

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF REFRACTORY PROTECTIVE COATINGS (ZrC; ZrC + C) IN THE REGION OF THEIR MELTING AND LIQUID PHASE (2000 - 5000 K)

The purpose of this work is to experimental study of the properties for refractory carbides in the melting range and liquid phase. First of all, this refers to the electrical resistivity, as well as to the thermal properties (enthalpy, heat capacity, introduced energy). The most refractory materials are needed for aviation and space technology. However, graphite melts only at pressures above 120 atmospheres [1], and it does not have high impact strength, like refractory metals.

Чистый графит, хотя и имеет температуру плавления 4800 - 4900 K [1], но плавится только при давлении выше 120 атмосфер [2]. Результаты исследования свойства тугоплавких карбидов в наиболее широком диапазоне температур, важны также и для атомной энергетики, так как ядерное топливо в виде сферических микро-твэлов покрывается защитными слоями карбидов и графита. Методом импульсного нагрева

током исследованы образцы карбида циркония [3]. Образец карбида зажимали между пластинами из кварцевого стекла, а затем на боковые грани ячейки наклеивали пластинки (рис.1). Ячейку (с торцов) зажимали между двумя электродами. Склейка боковых пластин осуществлялась только после плотного прижимания пластин кварца к образцу (рис.2).



карбида циркония
1 – нижняя пластина кварца; 2 – торец
пластинки карбида, шлифованный
совместно с пластинами кварца; 3 – верхняя
пластина кварца; 4 – боковая стеклянная
пластина.

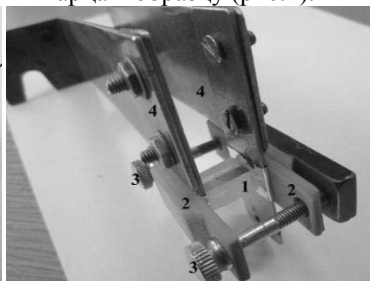


Рис.6. Кварцевая ячейка (в данном случае без накладки боковых кварцевых пластин), зажатая в подводящих ток электродах.

Измерения температуры выполнялись по излучению образца с помощью быстродействующего пирометра.

Температура начала фазового перехода для образцов $ZrC+C$ равна 3150 К, температура окончания фазового перехода равна 3450 К.

Для образцов ZrC температура начала фазового перехода 3500 К, а температура окончания 3820 К.

Список литературы

- [1] A.I.Savvatimskiy // Carbon at High Temperatures, in: Series in Materials Science, vol. 134, Springer, 2015, p. 1-246
- [2] N.A. Gokcen, E.T. Chang, T.M.Poston, D.I. Spencer // High Temp. Sci. 1976.Vol. 8 P. 81
- [3] A.Kondratyev, S.Muboyajan, S.Onufriev, A.Savvatimskiy // Journal of Alloys and Compounds. 2015, Vol. 631. Pp. 52–59

Т.О. СКЛЯДНЕВА, Е.Н. БОГДАНОВ

Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ-МИФИ, Саров, Россия

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА НАГРУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

С помощью одномерного и двумерного программного комплекса проведено моделирование работы нагружающих устройств, которое показало принципиальную возможность осуществления регистрации необходимых динамических параметров с применением современных методик непрерывной невозмущающей диагностики. Проведенные эксперименты в целом подтвердили расчётные характеристики нагружающих устройств. Выбранная конструкция нагружающего устройства позволяет осуществлять нагружение образцов из ВВ в диапазоне амплитуд ударных волн (пересжатых детонационных волн) от значения давления в состоянии Чепмена-Жуге (~30-35 ГПа) до значений ~55 ГПа.

T.O. SKLYADNEVA, E.N. BOGDANOV

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

DESIGN-THEORETICAL JUSTIFICATION AND EXPER- IMENTAL DEVELOPMENT OF THE LOADING DEVICES

Using a one-dimensional and two-dimensional software complex, a simulation of the operation of loading devices was carried out, which showed the fundamental possibility of registering the necessary dynamic parameters using modern methods of continuous non-perturbing diagnostics. The experiments performed generally confirmed the calculated characteristics of the loading devices. The selected design of the loading device allows loading samples from explosives in the amplitude range of shock waves (over-compressed detonation waves) from the pressure value in the Chapman-Jouget state (~ 30-35 GPa) to ~ 55 GPa.

В связи с возросшей ролью расчетного моделирования газодинамических процессов в последнее время имеется необходимость тестирования расчетных моделей с привлечением экспериментальной информации в области исследования ВВ и ПВ. Вследствие этого возникает ряд задач, к которым относятся: привлечение в экспериментальные исследования современных методик непрерывной регистрации, усовершенствование методов исследования и разработка конструкций прецизионных нагружающих устройств.

Результаты расчетов свидетельствуют, что выбранная конструкция нагружающего устройства обеспечивает возможность регистрации

необходимых параметров: скорости ударника W , скорости перескающей детонационной волны DC , скорости границы раздела ПВ-LiF, с помощью которых можно однозначно определить параметры перескающей детонационной волны в ВВ: давление P , массовую скорость U и плотность ρ .

В эксперименте разработанное нагружающее устройство было непосредственно применено для исследования перескающих продуктов взрыва состава на основе октогена. Для регистрации скоростей движения ударника W и границы раздела продукты взрыва-окно из фторида лития UP применена лазерная интерферометрическая методика VISAR. Для определения скорости перескающей детонационной волны в образце ВВ применялась электроконтактная методика.

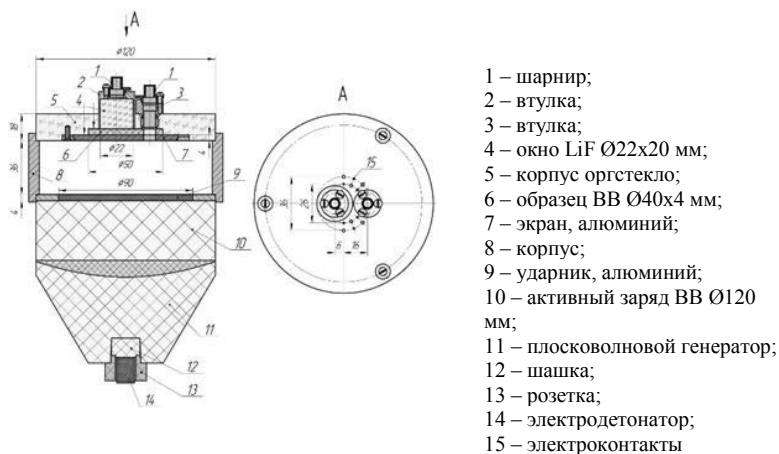


Рисунок 1/ Эскиз экспериментального устройства для исследования перескающих продуктов взрыва.

Список литературы

- [1] Исследование сдвиговой прочности стали 12Х18Н10Т методом негидродинамического затухания с использованием манганиновых датчиков. IX Харитоновские чтения под редакцией А.Л. Михайлова. Саров 2007 г. 484 с.
 [2] Прочность и ударные волны. Сборник научных трудов под редакцией академика РАЕН, Новикова С.А. Саров 1996 г.

В. А. СМЕТАНЮК¹, С. М. ФРОЛОВ^{1,2},

¹*Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва,* ²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СОСТАВА СМЕСИ НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Проведено трехмерное численное моделирование смесеобразования в кольцевой камере сгорания (КС) с раздельной подачей кислорода и метана. Рассмотрены две схемы с осевой и радиальной подачей топливных компонентов. Показано, что расчет позволяет подобрать такие условия подачи топливных компонентов, при которых достигается максимально быстрое и качественное смесеобразование в КС. Полученные результаты будут использованы при проектировании детонационного ракетного двигателя.

V. A. SMETANYUK¹, S. M. FROLOV^{1,2},

¹*N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow* ²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

NUMERICAL ANALYSIS OF MIXTURE FORMATION AND INFLUENCE OF NON-UNIFORMITY OF THE MIXTURE COMPOSITION ON THE PARAMETERS OF DETONATION OF THE ANNULAR COMBUSTION CHAMBER

A 3D numerical simulation of mixture formation in an annular combustor with separate supply of oxygen and methane has been performed. Two schemes with axial and radial supply of fuel components are considered. It is shown that numerical simulation allows one to choose the conditions for the supply of fuel components under which the fastest and high-quality mixing is achieved. The results will be used in the design of the detonation rocket engine.

В настоящее время одно из перспективных направлений развития силовых установок летательных аппаратов – использование непрерывно-детонационного горения в кольцевых камерах сгорания (КС). Такие КС позволят повысить энергоэффективность рабочего процесса по сравнению с классическими КС с дефлаграционным горением [1]. На рис. 1а показан

общий вид детонационной кольцевой КС. Компоненты горючей смеси подаются раздельно либо через кольцевую щель в огневом днище КС, либо через пояс радиальных отверстий, расположенный на внешней стенке КС (см. рис. 1б). Одна из задач, требующих решения в процессе создания такой КС – организация смешения топливных компонентов.

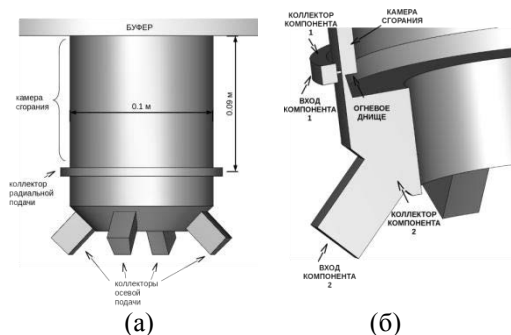


Рис. 1: Камера сгорания детонационного двигателя: (а) внешний вид, (б) разрез.

В данной работе на основе осредненных по Рейнольдсу трехмерных уравнений Навье–Стокса (RANS), дополненных $k-\xi-f$ -моделью турбулентности [2] проведено трехмерное численное моделирование смесеобразования в секторе кольцевой КС с раздельной подачей кислорода и метана. В расчетах использована методика адаптивного измельчения сетки, основанная на высоком пространственном разрешении областей с большими градиентами давления. Показано, что расчет позволяет подобрать такие условия подачи топливных компонентов, при которых достигается максимально быстрое и качественное смесеобразование в КС.

Работа выполнена в рамках государственного задания тема 0082-2016-0011 (номер гос. регистрации AAAA-A17-117040610346-5) и государственного задания тема 0082-2018-0004 (номер гос. регистрации AAAA_A18-118031590088-8).

Список литературы

- [1] Frolov S. M. et al. // Springer International Publishing AG 2018, 2018. Pp. 39 – 59.
- [2] Hanjalic K., Popovac M., Hadziabdic M. // Int. J. Heat Fluid Flow, 2004. No. 25. P. 897–901.

Е.Б. ГОРДОН¹, М.Е. СТЕПАНОВ¹, А.В. КАРАБУЛИН^{1,2},
В.И. МАТЮШЕНКО^{1,3}

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия*

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

³*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН,
Черноголовка, Россия*

СКВИД-МАГНИТОМЕТРИЯ НИКЕЛЕВЫХ НАНОПРОВОЛОК, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

В работе изучались магнитные свойства тонких ($d < 4$ нм) никелевых нанопроволок, полученных методом лазерной абляции металлической мишени в сверхтекучем гелии. Исследование проводилось с помощью СКВИД-магнитометра при комнатной температуре. Было обнаружено, что при малых концентрациях вещества, образцы обладают прямоугольной петлёй гистерезиса, становящейся пологой при увеличении концентрации нанопроволок на поверхности подложки.

E.B. GORDON¹, M.E. STEPANOV¹, A.V. KARABULIN^{1,2},
V.I. MATYUSHENKO^{1,3}

¹*Institute of Problems of Chemical Physics, RAS, Chernogolovka, Russia*

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

³*The Branch of Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics RAS,
142432, Chernogolovka, Moscow Region, Russia*

SQUID-MAGNETOMETRY OF NICKEL NANOWIRES GROWN BY LASER ABLATION IN SUPERFLUID HELIUM

The subject of research was magnetization behavior of thin ($d < 4$ nm) nanowires grown by laser ablation of metal target in superfluid helium. The investigation performed with SQUID magnetometer at room temperature has shown that specimens with low concentrations of nanowires exhibit rectangular hysteresis curves, whereas an increase of nanowires amount leads to the flattening of the curves.

В рамках данного исследования методом лазерной абляции мишени в объёме сверхтекучего гелия [1] выращивались нанопроволоки из ферромагнитного металла – никеля. Фотография проволок, полученная с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM-2000FX, приведена на рис. 1а. Получающиеся во время эксперимента

нанопроволоки осаждались на подложках из монокристаллического кремния, являющегося диамагнетиком, а после извлечения из криостата переносились в камеру СКВИД-магнитометра (MPMX 5XL Quantum Design). Исследовались полевые зависимости намагниченности при комнатной температуре. Оказалось, что форма полученных петель гистерезиса сильно зависит от концентрации нанопроволок на поверхности подложки. Наиболее интересными оказались образцы с малой плотностью ферромагнитных нанопроволок. Результат измерений для такого образца приведен на рис. 1b (сканирующее поле прикладывалось в плоскости подложки, диамагнитный вклад кремния, вычисляемый по наклону хвостовых участков, вычтен). Видно, что петля гистерезиса имеет строго прямоугольный вид с крайне резкими переходами при коэрцитивной силе 0,5 kOe. Такая петля характерна для ориентированных в одном направлении магнитов. Увеличение концентрации ведет, помимо увеличения намагниченности насыщения, к появлению заметного наклона и сглаживанию петли. Найденным зависимостям предложены варианты объяснения, предоставляющие возможность экспериментальной проверки.

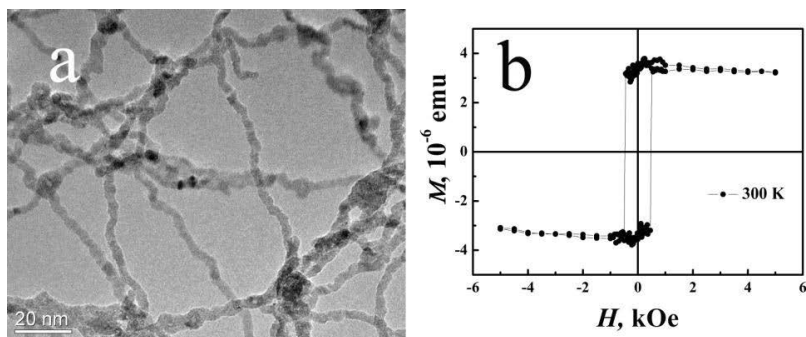


Рис. 1. а) ТЕМ микроскопия образцов Ni нанопроволок на стандартной подложке – сеточке для ТЕМ. б) Петля гистерезиса намагниченности, соответствующая малому количеству Ni на подложке из Si.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00620).

Список литературы

[1] Gordon E. B., Karabulin A. V., Matyushenko V. I., Sizov V. D., and Khodos I. I., // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2011, vol. 112, № 6, P. 1061–1070.

С.А. ГУБИН, С.И. СУМСКОЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ПРИ СКАЧКООБРАЗНОМ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ПРОДУКТАХ

Рассмотрена структура детонационной волны в предположении резкого изменения скорости звука за счет изменения теплоемкости продуктов детонации. Задача рассматривалась для идеального газа, в котором изменение теплоемкости происходит за счет последовательного возбуждения k степеней свободы в молекуле. В этом случае показатель адиабаты определяется отношением $(k+2)/k$. Показана возможность формирования последовательности звуковых плоскостей в потоке при изменении k . Определены параметры таких волн.

S.A. GUBIN, S.I. SUMSKOI

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

STRUCTURE OF THE DETONATION WAVE DURING A SHARP CHANGE IN SOUND SPEED IN PRODUCTS

The structure of the detonation wave is considered under the assumption of a sharp change in the speed of sound due to a change in the heat capacity of the detonation products. The problem was considered for an ideal gas in which the change in heat capacity occurs due to the successive excitation of k degrees of freedom in the molecule. In this case, the adiabatic index is determined by the ratio $(k + 2)/k$. The possibility of forming a sequence of sound planes in the stream as k varies is shown. The parameters of such waves are determined.

Как известно, в реакционноспособных смесях может существовать сверхзвуковой самоподдерживающийся стационарный режим распространения волны энерговыделения. Такой режим получил название детонации Чэпмена-Жуге (ЧЖ). Плоскость ЧЖ представляет собой поверхность, на которой скорость среды равна местной скорости звука. Обычно плоскость ЧЖ образуется после существенного роста температуры при химических реакциях.

Однако, помимо этого механизма образования звуковой плоскости, связанного с энерговыделением, ростом температуры и соответствующим изменением скорости звука, теоретически существует возможность образования звуковой плоскости и только за счет изменения скорости звука.

Ранее в [1, 2] была показана принципиальная возможность существования подобной стационарной структуры с двумя звуковыми плоскостями в идеальном газе.

Изменение теплоемкостей, и, соответственно, показателя адиабаты и скорости звука, может происходить при различных условиях. Будем считать, что изменение теплоемкости и скорости звука происходит без изменения плотности, давления и молярной массы.

Если показатель адиабаты изменяется, например, как:

$$\gamma_m = \gamma_\infty + \alpha^{m-1}(\gamma_{\max} - \gamma_\infty),$$

то число звуковых плоскостей может быть бесконечным.

Здесь $\gamma_{\max}$ - максимальный показатель адиабаты в самой дальней от фронта звуковой плоскости, γ_∞ - показатель адиабаты в самой ближней к фронту звуковой, α - некоторое число меньшее 1. Чем больше номер m тем она ближе к фронту.

Изменение отношения давлений (p_{m-1}/p_m) и скоростей звука (c_{m-1}/c_m) в двух соседних плоскостях m и $m-1$ с учетом выбранного закона изменения показателя адиабаты определяется по следующим формулам:

$$\frac{p_{m-1}}{p_m} = \frac{p_0 + \frac{\rho_0 u_0^2}{(\gamma_\infty + \alpha^{m-1}(\gamma_{\max} - \gamma_\infty) + 1)}}{p_0 + \frac{\rho_0 u_0^2}{(\gamma_\infty + \alpha^m(\gamma_{\max} - \gamma_\infty) + 1)}} \frac{\left[1 - (\gamma_\infty + \alpha^{m-1}(\gamma_{\max} - \gamma_\infty)) \frac{p_0}{\rho_0 u_0^2}\right]}{\left[1 - (\gamma_\infty + \alpha^m(\gamma_{\max} - \gamma_\infty)) \frac{p_0}{\rho_0 u_0^2}\right]},$$

$$\frac{c_{m-1}}{c_m} = \frac{(\gamma_\infty + \alpha^{m-1}(\gamma_{\max} - \gamma_\infty))}{(\gamma_\infty + 1 + \alpha^{m-1}(\gamma_{\max} - \gamma_\infty))} \frac{(\gamma_\infty + 1 + \alpha^m(\gamma_{\max} - \gamma_\infty))}{(\gamma_\infty + \alpha^m(\gamma_{\max} - \gamma_\infty))}.$$

Здесь p_0 и ρ_0 - начальные давления и плотность, u_0 - скорость волны.

В случае если показатель адиабаты определяется отношением $(k+2)/k$ и, соответственно, зависит от количества возбужденных степеней свободы k отношения скоростей звука в двух соседних звуковых плоскостях с k и $k+1$ возбужденными степенями свободы приобретает еще более простой вид:

$$\frac{c_k}{c_{k+1}} = \frac{(k+2)^2}{(k+1)(k+3)}$$

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00188).

Список литературы

- [1] Губин С.А., Сумской С.И.// Безопасность труда в промышленности. 2013. № 7, С.40-45.
- [2] Gubin S.A., Sumskoi S.I., Victorov S.B.// Physics Procedia. 2015. V. 72. P. 324-328.

А.С. УСТЮХИН, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ, М.И. АЛЫМОВ,
А.Б. АНКУДИНОВ

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской
академии наук, Россия, Москва*

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ШИХТЫ НА СВОЙСТВА ПОРОШКОВОГО МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА FE-30CR-8CO

Одной из стадий порошкового метода изготовления магнитных материалов является подготовка шихты из смеси элементарных порошков Fe, Cr, Co путем их смешения в смесителях различной конструкции. Однородность исходной смеси, а в конечном итоге и качество готового магнита, в значительной степени зависят от продолжительности данной операции. Поэтому одной из задач настоящего исследования являлось изучение влияния времени смешения на равномерность распределения компонентов в шихте.

A.S. USTYUKHIN, V.A. ZELENSKY, M.I. ALYMOV,
A.B. ANKUDINOV

*Baikov Institute for Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow*

THE INFLUENCE OF THE PREPARATION CONDITIONS OF THE MIXTURE ON THE PROPERTIES OF THE POWDER MAGNETICALLY HARD ALLOY FE-30CR-8CO

One of the stages of the powder method of manufacturing magnetic materials is the preparation of a mixture from elemental powders Fe, Cr, Co by mixing them in mixers of various designs. The homogeneity of the initial mixture, and ultimately the quality of the produced magnet, largely depends on the duration of this operation. Therefore, one of the objectives of this work was to study the effect of mixing time on the distribution of components in the mixture.

Были изготовлены прессовки состава Fe-30Cr-8Co из порошковых смесей со временем смешения исходной шихты от 1 мин. до 300 мин. Для анализа степени перемешивания исходных порошков в зависимости от времени смешения была сделана электронная микроскопия и поэлементное картирование поверхности прессовок. На рис. 1 приведены результаты исследования распределение элементов по поверхности образцов, спрессованных из шихт, смешанных в течение 1 и 60 минут.

Результаты представлены в одном масштабе увеличения. Анализ картирования соответствующих элементов показал, что при 60 минутах перемешивания наблюдается более равномерное распределение элементных порошков в шихте по сравнению со временем смешения в течение 1 минуты.

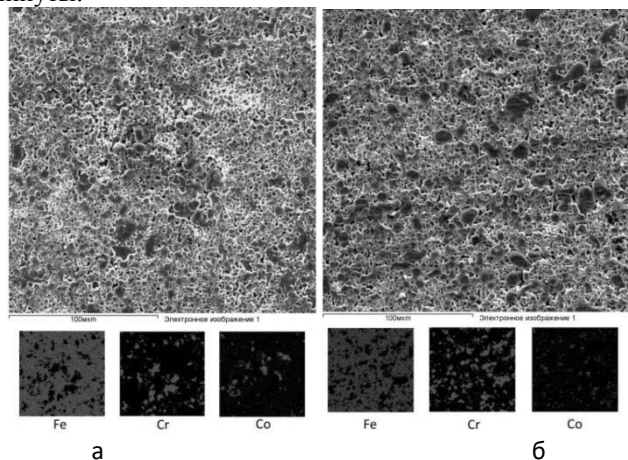


Рис. 1: Картирование поверхности прессовки из шихты, смешанной 1 мин (а) и 60 мин (б)

Данное различие наиболее выражено на картах распределения кобальта. При смешении в течение 1 минуты порошок кобальта остается в агломерированном состоянии (см. рис. 1а). На карте распределения хрома можно наблюдать как скопления частиц хрома, так и достаточно большие обедненные области (рис. 1а). При этом порошок железа распределен в достаточной степени равномерно. Очевидно, что смешения в течение 1 мин явно недостаточно чтобы агломераты были разбиты. При смешении в течение 60 минут и более подобных агломератов кобальта не наблюдается. Прессовки после изучения микроструктуры поверхности спекали при двух температурах (1200°C и 1400°C) и подвергали дальнейшей термообработке. Оказалось, что время смешения шихты сильно влияет на магнитные свойства спеченного сплава Fe-30Cr-8Co при температуре спекания 1200°C . В то же время магнитные свойства сплава Fe-30Cr-8Co, спеченного при 1400°C , оказались независимыми от времени смешения шихты во всем исследованном диапазоне времен смешения элементных порошков (1-60 минут).

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-03-00666-а и государственного задания № 007-00129-18-00.

ФРОЛОВ С. М.^{1,2,3}, БАСЕВИЧ В.Я.¹, МЕДВЕДЕВ С. Н.¹,
ФРОЛОВ Ф. С.^{1,3}

¹*Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук;*

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

³*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук*

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ЗАРЕВО»: БЕСПЛАМЕННОЕ ГОРЕНИЕ КАПЛИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Космический эксперимент «Зарево» в рамках совместной российско-американской программы по реализации экспериментов на борту Международной космической станции – яркий пример возможности международной кооперации в ходе научной деятельности. Приводятся основные результаты, полученные в ходе реализации эксперимента по горению одиночных капель тяжелых углеводородных горючих в условиях микрогравитации, и результаты обработки полученных экспериментальных данных.

S. M. FROLOV^{1,2,3}, V. Ya. BASEVICH¹, S. N. MEDVEDEV¹,
F. S. FROLOV^{1,3}

¹*N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Russia*

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

³*Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

SPACE EXPERIMENT “ZAREVO”: FLAMELESS COMBUSTION OF DROPLET IN MICROGRAVITY

The Zarevo space experiment within the framework of the joint Russian-American program for the implementation of experiments onboard the International Space Station is a vivid example of the possibility of international cooperation in the course of scientific activities. The main results obtained during the implementation of the experiment on the combustion of single droplets of heavy hydrocarbon fuels under microgravity conditions and the results of processing the experimental data are presented.

Цель космического эксперимента (КЭ) «Зарево», проведенного на МКС в 2017 г. – получение исходных данных для разработки модели горения жидких углеводородных горючих в условиях микрогравитации в интересах создания систем пожарной безопасности в герметичных отсеках космических аппаратов [1]. Основной объект исследований – беспламенное горение капель тяжелых углеводородов (н-додекана и др.) после радиационного погасания «горячего» пламени. Радиационное погасание горячей капли связано с образованием вокруг нее сферической оболочки из мелких частиц сажи, которые поглощают часть тепловой энергии пламени и излучают ее в окружающую среду, приводя к безвозвратным потерям энергии и прогрессирующему снижению скорости испарения капли и скорости горения паров горючего. Научное сопровождение КЭ обеспечивала международная кооперация ученых: с американской стороны сотрудниками ряда университетов, а с российской стороны – Институтом химической физики Российской академии наук им. Н. Н. Семенова (ИХФ РАН). В рамках КЭ проведено 302 опыта с различными составами горючих смесей, сгорание которых производилось в газовой атмосфере с варьируемыми составом и параметрами (давлением и др.). Более 220 из них признаны успешно завершенными. В ИХФ РАН на основе физико-математической модели горения капли и детального кинетического механизма окисления и горения н-додекана $C_{12}H_{26}$ изучены особенности вынужденного зажигания и горения, а также самовоспламенения капли н-додекана в атмосфере воздуха при нормальном давлении в условиях микрогравитации [2]. Сделанные расчеты показали, что после радиационного погасания «горячего» пламени капля может продолжать испаряться благодаря экзотермическому низкотемпературному окислению паров горючего с многократными вспышками «голубого» пламени при характерной температуре 980–1000 К. Детальный анализ результатов расчета показывает, что эти вспышки возникают вследствие термического распада пероксида водорода – разветвления с выходом гидроксильных радикалов.

Список литературы

- [1] Новицкий О.В., Пеклевский А.В., Пичугин С. Б., Фролов С.М. и др. // Горение и взрыв, 2018, том 11, №4, с. 3 – 13.
- [2] Фролов С.М., Басевич В.Я., Медведев С.Н., Фролов Ф.С. // Горение и взрыв, 2017, Т. 10, № 3, с. 36 – 42.

В.А. ШАРГАТОВ^{1,2}, С.В. ГОРКУНОВ¹

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

²*Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
Москва, Россия*

ДВА РЕЖИМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С РАСПОЛОЖЕННЫМИ В КАНАЛЕ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Численно и аналитически исследовано распространение ударной волны в канале с периодически расположенными прямоугольными препятствиями. Полученное приближенное аналитическое решение предсказывает, что при определенной геометрии канала с препятствиями в нем не может существовать ударная волна заданной интенсивности, распространяющаяся с постоянной скоростью. Этот вывод подтвержден результатами численного моделирования, и показано, что в этом случае в канале формируется область повышенного давления, которая распространяется вдоль канала, увеличивается в размере и генерирует волны сжатия.

V.A. SHARGATOV^{1,2}, S.V. GORKUNOV¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia,* ²*Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow,*

Russia

TWO REGIMES OF SHOCK WAVE INTERACTION WITH A LONGITUDINAL ARRAY OF OBSTACLES IN A DUCT

We investigate shock interaction with a longitudinal array of obstacles in a duct. For certain geometry of the channel our approximate analytical solution predicts the disappearance of a shock wave propagating at a constant speed. We show that in this case, in the part of the tube where the obstacles are located, a high pressure region is formed. This region propagates at high but subsonic speed. This region expands over time and generates compression waves.

Исследовано течение, возникающее при входе длинной ударной волны в прямоугольный канал с периодически расположенными препятствиями, которые имеют форму параллелепипедов. Полученное нами в [1] приближенное аналитическое решение показывает, что в этом случае в канале может сформироваться распространяющийся с постоянной средней скоростью комплекс, состоящий из гидродинамического разрыва и присоединенной зоны релаксации, как показано на рис. 1. Полученная аналитически скорость распространения такого комплекса и значения параметров потока за зоной релаксации хорошо согласуются с данными численного расчета.

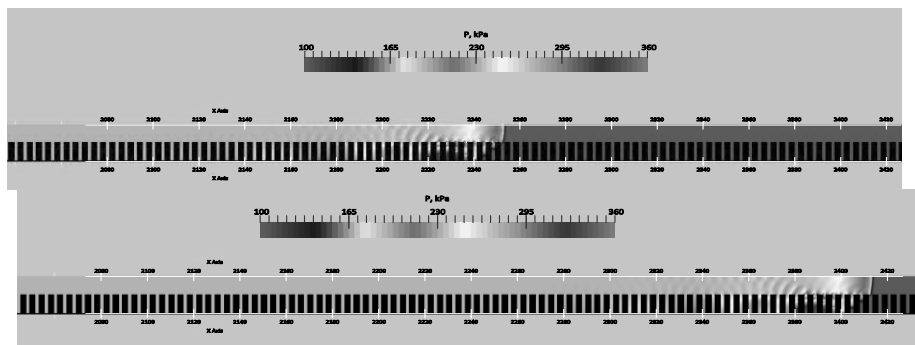
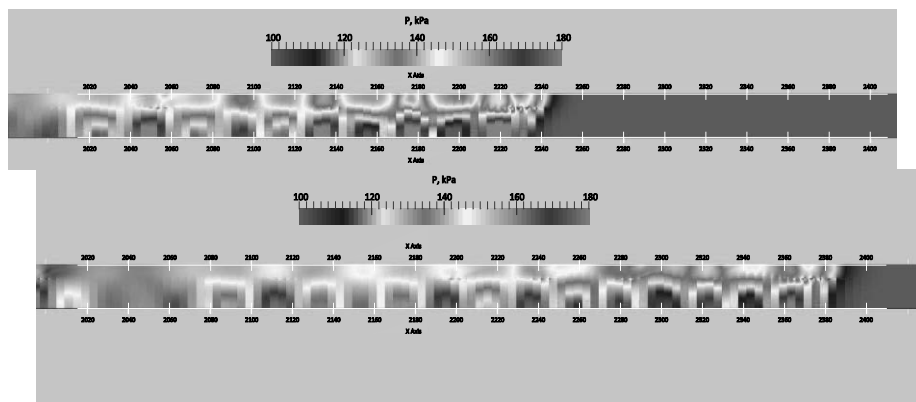


Рис. 1. Поле давления с лидирующей ударной волной и присоединенной зоной релаксации для двух последовательных моментов времени.

Аналитическое решение предсказывает, что подобный комплекс не может существовать при определенной геометрии канала (высокие и достаточно близко расположенные препятствия) для волны заданной интенсивности. Этот вывод подтверждается выполненными вычислительными экспериментами. Путем численного моделирования установлено, что в этом случае в канале формируется область высокого давления, которая перемещается с дозвуковой скоростью. Эта область расширяется с течением времени и излучает волны сжатия, как показано на рис.2.



Список литературы

- [1] Шаргатов В.А., Чугайнова А.П., Горкунов С.В., Сумской С.И. // Труды Математического института им. В.А. Стеклова РАН. 2018. Т. 300. С. 216-228.

В.С. ШУСТОВ¹, В.А. ЗЕЛЕНСКИЙ¹, А.Б. АНКУДИНОВ¹, Н.М.
РУБЦОВ²

¹- Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия, ²- Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НАНОСТРУКТУРНЫМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

Были изготовлены пористые носители из порошков нержавеющей стали марки X18H10T с бимодальным распределением пор по размеру (порядка 10 мкм и порядка 200 мкм). На поверхности пор создана наноструктура из оксида алюминия, представляющая собой пленку нанометровой толщины.

V.S. SHUSTOV¹, V.A. ZELENSKY¹, A.B. ANKUDINOV¹, N.M.
RUBTSOV²

¹- Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ²- Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

MODIFICATION OF THE POROUS SURFACE OF STAINLESS STEEL BY NANOSTRUCTURAL ALUMINUM OXIDE

Porous samples with a bimodal pore size distribution (about 10 μm and about 200 μm) from stainless steel X18H10T powders were made. Nanostructure of aluminum oxide, which is a film of nanometer thickness, on the surface of the pores is created.

Синтез пористого материала и модификация его внутриверхотного пространства проводились путем пропитки пористых носителей, изготовленных из порошка нержавеющей стали X18H10T, растворами солей с последующим их термическим разложением.

Процесс изготовления пористого образца заключался в компактировании смеси порошка нержавеющей стали (со средним размером частиц 10-20 мкм) и порообразователя (размер частиц 250-320 мкм) с приложением одностороннего давления 400 МПа. Улетучивание порообразователя и спекание при температуре 700 °С приводило к образованию пористой структуры в материале, которая при этом характеризовалась бимодальным распределением пор по размеру. На рис.1 представлено изображение поверхности излома спеченного образца. На изображении хорошо видны крупные поры в образце, размер которых

составляет примерно 200 мкм, а так же можно заметить наличие каналов, видимых как чёрные пятна. Эти каналы могут соединять поры по всему объёму образца, имея выходы в пространство разрозненных пор.

Модифицирование поверхности пористого носителя оксидом алюминия производилось путем пропитки его водным раствором соли нитрата алюминия $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Пористый образец пропитывался растворами солей разной концентрации от 0,5 до 1,5 моль/литр. В результате сушки и последующего отжига при температуре 450 °С в течение 60 минут в атмосфере проточного аргона происходило разложение оставшейся соли и гидроксида алюминия, образовавшегося в результате гидролиза, до оксида.

По результатам растровой электронной микроскопии также установлено присутствие в материале пор размером порядка 10 мкм, обусловленных размером частиц порошка нержавеющей стали. На рисунке 2 видно, как на поверхности пористого носителя образовалась структура в виде тонкой плёнки. Микрорентгеноспектральный анализ показал наличие алюминия и кислорода, при чём на поверхности частиц носителя содержание алюминия составляло меньше 1 масс.%, что может объясняться нанометровой толщиной плёнки, образовавшейся на поверхности.

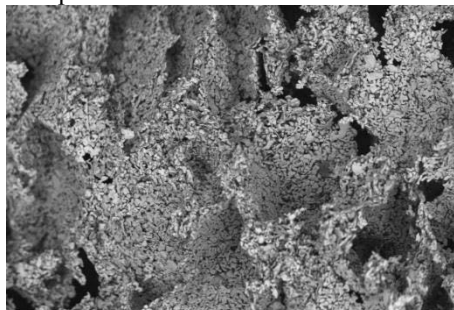


Рис.1. Микрофотография излома образца из нержавеющей стали.

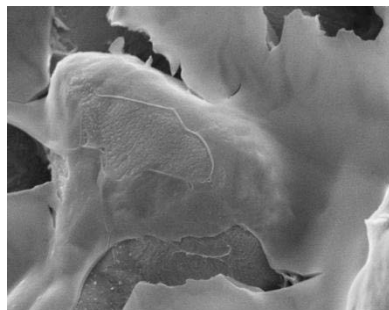


Рис.2. Микрофотография излома образца после нанесения оксида алюминия

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-03-00867.

Я. Э. ПОРОШИНА¹, П. С. УТКИН², С. В. ФОРТОВА²
¹ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,* ²
ФГБУН Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ ПЛАСТИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

Моделируется высокоскоростное взаимодействие металлических пластин с использованием модели Баера-Нунциато. Описана методика локального подбора параметров двучленного уравнения состояния. Данный подбор осуществляется в каждой расчетной ячейке при использовании широкодиапазонного УРС.

YA. E. POROSHYNA¹, P. S. UTKIN², S. V. FORTOVA²
¹ *Moscow Institute of Physics and Technology (State University) Dolgoprudny,*
Russia, ² *ICAD RAS, Moscow*

NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-SPEED PLATES IMPACT USING WIDE-RANGE EQUATIONS OF STATE

The high-speed interaction of metal plates is simulated using Baer-Nunziato model. The method of local selection of stiffened gas equation of state parameters is described. The selection is performed in each computational cell using wide-range equation of state.

Данная работа является развитием исследования [1], в котором задача о высокоскоростном соударении металлических пластин рассматривается в газодинамическом приближении с использованием двухжидкостной математической модели Баера-Нунциато. Постановка задачи соответствует натурным экспериментам [2]. На покоящуюся стальную пластину толщиной 3 мм налетает со скоростью 500 м/с свинцовая пластина толщиной 2 мм. Слева и справа от пластин находится воздух.

Математическая модель основана на модели Баера-Нунциато для описания высокоскоростных течений гетерогенных сжимаемых сред. Вычислительный алгоритм [1] основан на процедуре расщепления по процессам, методе HLL на гиперболическом этапе и процедуре релаксации давления для обеспечения устойчивого расчета в присутствии межфазных границ.

В отличие от [1] в данной работе для описания каждого из металлов применяется широкодиапазонное уравнение состояния (УРС) [3]. Реализация осуществляется путем локальной аппроксимации в каждой расчетной ячейке на каждом шаге по времени широкодиапазонных УРС двучленным УРС, определяемого параметрами γ и P_0 :

$$e = \frac{p + \gamma P_0}{\rho(\gamma - 1)}.$$

С помощью широкодиапазонного УРС вычисляется значение внутренней энергии e по давлению p и плотности ρ . Затем вычисляется $e + \Delta_1 e$ при давлении $p + \Delta p$ и плотности ρ и $e + \Delta_2 e$ при давлении p и плотности $\rho + \Delta \rho$. После этого аппроксимируются частные производные e_p и e_ρ , и параметры γ и P_0 находятся в результате решения соответствующей системы уравнений:

$$e_p \approx \frac{(e + \Delta_1 e) - e}{(p + \Delta p) - p} = \frac{\Delta_1 e}{\Delta p} = \frac{1}{\rho(\gamma - 1)}, \quad e_\rho \approx \frac{(e + \Delta_2 e) - e}{(\rho + \Delta \rho) - \rho} = \frac{\Delta_2 e}{\Delta \rho} = -\frac{p + \gamma P_0}{\rho^2(\gamma - 1)},$$

$$\gamma = 1 + 1/(\rho e_p), \quad P_0 = -\rho^2(\gamma - 1)/(\gamma e_p) - p/\gamma.$$

На рис. 1 представлены профили давления и объемной доли веществ, полученные при решении рассматриваемой задачи с применением широкодиапазонных УРС стали и свинца.

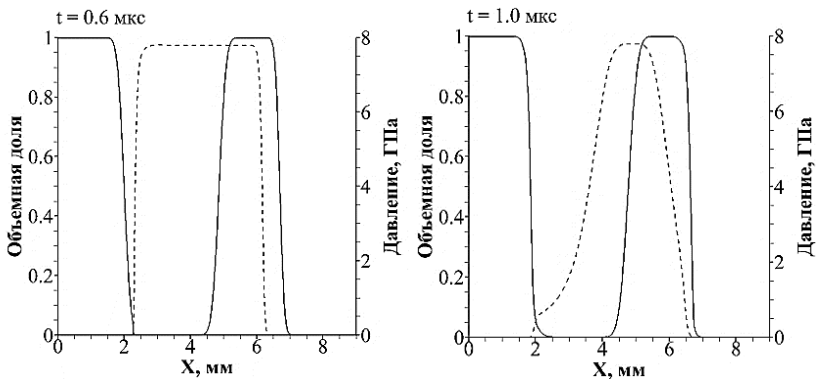


Рис. 1. Профили объемной доли и давления. Сплошной линией обозначена объемная доля веществ, пунктирной – давление.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках проекта РНФ № 17-11-01293.

Список литературы

- [1] П. С. Уткин, С. В. Фортова. // Горение и взрыв. 2018. Т. 11. № 4. С. 118 – 124.
- [2] И. В. Яковлев. // ФГВ. 1973. Т. 9. № 3. С. 447.
- [3] А. В. Бушман, И. В. Ломоносов, В. Е. Фортов. Модели широкодиапазонных уравнений состояния веществ при высоких плотностях энергии // Препринт № 6 – 287. 1990. ИВТ АН СССР.

ЕФРЕМОВ В.П.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН), Москва, Россия*

ДЕТОНАЦИОННЫЙ РЕЖИМ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ОПТИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Нарушение световой проводимости световода, транспортирующего интенсивное лазерное излучение, приводит к поглощению энергии и появлению ярко светящейся лазерной плазмы. Плазма начинает двигаться навстречу излучению, необратимо повреждая световод. В зависимости от интенсивности потока возможны различные скорости распространения повреждения.

V.P. EFREMOV

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT),
Moscow, Russia*

DETONATION MODE OF DESTRUCTION OF OPTICAL FIBER MATERIALS UNDER LASER RADIATION ACTION

Damage of the light conductivity in the light guide transporting intense laser radiation leads to the absorption of energy and the appearance of a bright laser plasma. The plasma begins to move towards the radiation, irreversibly damaging the light guide. Depending on external energy source, different damage propagation velocities are possible.

Нарушение световой проводимости световода, транспортирующего интенсивное лазерное излучение, приводит к поглощению энергии и появлению ярко светящейся лазерной плазмы. Плазма начинает двигаться навстречу излучению, необратимо повреждая световод. Возникает разрушение среды под действием внешнего источника энергии. В зависимости от интенсивности потока возможны различные скорости распространения повреждения. Это либо «горение» световодов, либо «оптическая детонация» [1, 2]. Оба эти процесса «горение» и «оптическая детонация» световодов разрушают световую проводимость кварцевых световодов по всей длине. Скорость распространения «горения» зависит от плотности энергии и составляет несколько метров в секунду. Детонационно-подобный режим разрушения распространяется со скоростями несколько километров в секунду. Этот режим был обнаружен

в ОИВТ РАН совместно с НЦВО РАН в 2006 году [1]. Скорость распространения «детонационного разрушения» на два порядка величины быстрее, чем известные опубликованные данные по горению световодов и составляет ~ 3 км/с. Анализ предельных возможных скоростей такого режима имеет значение как для безопасности оптических линий на основе кварцевых световодов. В качестве объекта исследований мы выбрали одномодовые кварцевые световоды. В одномодовых световодах переносимая энергия одинакова в каждом сечении сердцевины световода.

Цель настоящей работы – разработка экспериментальных методов изучения разрушения материалов оптических световодов при интенсивном энерговыделении и анализ характера разрушения материалов световодов при детонационно-подобном режиме распространения разрушения.

В данной работе мы представляем разработанные методы для экспериментального изучения детонационно-подобного режима разрушения световодов. Особенностью регистрации структуры детонационного фронта в кварцевых световодах были быстрое перемещение объекта съемки и маленькие размеры явления. Диаметр зона плазмы не превышал 6-7 мкм.

Разработанные экспериментальные методы позволили визуализировать структуру детонационного фронта в кварцевых световодах под действием интенсивного лазерного излучения [3,4]. Для режимов «оптической детонации» зарегистрирован сложный характер течения во фронте (двух волновая конфигурация).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (код программы I.31П).

Список литературы

- [1] Dianov E.M., Fortov V.E., Bufetov I.A., Efremov V.P., Frolov A.A., Schelev M.Y. and Lozovoi V.I. // J. Exp. Theo. Phys. Lett., 2006. V. 83. № 2. Pp. 75 - 78.
- [2] Efremov V.P., Frolov A.A., Dianov E.M., Bufetov I.A., Fortov V.E. // Archives of Metallurgy and Materials, 2014. V. 59. № 4. Pp. 1599 - 1603.
- [3] Efremov V.P., Fortov V.E., Frolov A.A. // Journal of Physics: XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 2015. V. 653. P. 012013.
- [4] Efremov V.P., Utkin A.V. // Advanced Materials and Technologies, 2018. № 3, Pp. 17-21.



MILLAB

TECHNOLOGY

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОМПАНИИ



- Вакуумная техника: насосы, гелиевые течеискатели, вакуумные камеры, сверхвысоковакуумная арматура.
- Термообработка: печи, вакуумные шкафы.
- Испытание материалов: климатические камеры, камеры коррозии.
- Жидкостные термостаты
- Аналитика: спектрометры, хроматографы, анализаторы.
- Весь спектр оборудования для химического синтеза.



ПРЕИМУЩЕСТВА НАШЕЙ КОМПАНИИ

- Официальный дистрибьютор
- Сертифицированная сервисная поддержка
- Бесплатное тестирование оборудования компании МИЛЛАБ на вашей установке
- Реализация технически сложных проектов, комплексные поставки
- Лучшие цены
- Склад в Москве с запасом востребованного оборудования



+7 (495) 933-71-47 www.millab.ru info@millab.ru

В НАЛИЧИИ НА СКЛАДЕ
ГАРАНТИЯ 2 ГОДА

–35%



TwisTorr 304 FS и IDP-7

Для небольших систем

- Вакуум до 1×10^{-10} мбар.
- Производительность до 250 л/с.

Новейшие технологии в турбомолекулярных насосах Agilent

- Молекулярная ступень TwisTorr: превосходный коэффициент сжатия в том числе и лёгких газов и хорошее предельное давление.
- Технология плавающей подвески AFS: улучшенная стабильность к повышенным газовым нагрузкам.

Надёжные спиральные насосы Agilent

- Высокая производительность в своем классе.
- Увеличенный срок службы торцевых уплотнений (более пяти лет).
- Изолированные: рабочий газ не попадает в двигатель насоса.

TwisTorr 704 FS/804 FS и IDP-10

Насосы с высокой производительностью

- Вакуум до 1×10^{-10} мбар.
- Производительность до 660/720 л/с.

Новейшие технологии в турбомолекулярных насосах Agilent

- Технология плавающей подвески AFS: снижает нагрузку на подшипники и существенно увеличивают срок эксплуатации насоса.
- Закапсулированные подшипники на твердой консистентной смазке не загрязняют вакуум и не требуют обслуживания.

Надёжные спиральные насосы Agilent

- Герметичные: откачиваемый газ не попадает во внешнюю атмосферу.
- Изолирующий клапан защищает откачиваемую систему от разгерметизации и при внезапной остановке насоса способен закрыться



Официальный дистрибьютор Agilent — Компания МИЛЛАБ

127247, Москва, Дмитровское ш., д. 100, стр2 | бизнес-центр North House
Т: +7 (495) 933-71-47 www.millab.ru info@millab.ru



