

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)

УДК 537.622;544.015.4;548.5

ГР № 115121810062

Инв. № 11214-36/2115-91

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

» 2016 г.



О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Электронный спиновый резонанс, спинзависимые электронные  
эффекты и спиновые технологии» (промежуточный)

Научные руководители  
член-корр. РАН

И.В. Кукушкин

доктор физ.-мат. наук

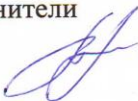
В.В. Рязанов

г. Черноголовка  
2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



В.В.Рязанов (Введение, 1.32.2,  
заключение)

Гл.н.с., д.ф.-м.н. чл-корр. РАН



И.В.Кукушкин (1.32.1.)

### Исполнители:

в.н.с., д.ф.-м.н



С.И. Губарев (1.32.1)

в.н.с., д.ф.-м.н



Л.С.Успенская (1.32.2)

с.н.с., к.ф.-м.н



В.В.Большинов (1.32.2)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 12 страниц, 1 источник

*Ключевые слова:*

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ  
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, ЭЛЕКТРОННЫЙ СПИНОВЫЙ РЕЗОНАНС,  
ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

*Объектом исследования* являются двумерные электронные системы в квантовых ямах AlAs и ZnO/MgZnO, а также слабый низкотемпературный ферромагнетик  $\text{Pd}_{99}\text{Fe}_{01}$ .

*Целями работы являются:*

- Разработка методов исследования электронного спинового резонанса в низкоразмерных электронных системах.
- Изучение анизотропии g-фактора двумерных электронов в квантовых ямах AlAs.
- Разработка методов исследования ферромагнитного резонанса в тонких пленках.
- Разработка теоретических моделей взаимодействия мод возбуждений, возникающих в ферромагнитных пленках.

*Результаты работы:*

- Методами электронного спинового и ферромагнитного резонансов исследованы полупроводниковые и сверхпроводниковые гетероструктуры.
- Измерены фундаментальные значения g-фактора в системе тяжелых фермионов в квантовых ямах AlAs, обнаружена значительная анизотропия g-фактора.

- Разработана методика низкотемпературных измерений ферромагнитного резонанса в тонких ферромагнитных пленках и гибридных бислойных структурах сверхпроводник-ферромагнетик непосредственно на подложке.
- Разработаны теоретические модели взаимодействующих сверхвысокочастотных мод, возникающих в ферромагнитных слоях и длинных джозефсоновских переходах.

### *Область применения*

В ходе выполнения НИР в 2015 году получены результаты перспективные для разработки нового класса наноструктур, необходимых для создания новых телекоммуникационных приборов

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
Основная часть .....	9
1.32.1 Разработка методики детектирования электронного спинового резонанса.....	9
1.32.2 Электронный спиновый резонанс в полупроводниковых низкоразмерных структурах с двумерным электронным газом.....	9
1.32.3 Ферромагнитный резонанс в ферромагнитных слоях и гибридных структурах ферромагнетик-джозефсоновский переход .....	10
Заключение .....	11
Список использованных источников.....	12

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР                      Научно-исследовательская работа

РЦКП ИФТТ РАН        Распределенный центр коллективного пользования  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
физики твердого тела Российской академии наук

ФГУП «ВНИИМС»        Федеральное государственное унитарное предприятие  
Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической  
службы

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Электронный спиновый резонанс, спинзависящие электронные эффекты и спиновые технологии» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

Резонансные методы являются эффективными способами исследования спиновых явлений. Для применения спиновых явлений в спинтронике необходимо разработка применения этих методик в низкоразмерных системах, в частности, полупроводниковых гетероструктурах с двумерным электронным газом, сверхпроводящих гибридных структурах сверхпроводник- ферромагнетик. В рамках работ отчетного периода по программе РАН продемонстрировано использование электронного спинового резонанса для исследования спиновых явлений в квантовых ямах AlAs, а также ферромагнитного резонанса для обнаружения взаимодействия сверхвысокочастотных мод в ферромагнитных слоях и длинных джозефсоновских переходах.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Исследование электронного спинового резонанса в низкоразмерных электронных системах, несмотря на большую актуальность, имеет очень малое распространение в мире. Это связано, прежде всего, с тем, что полное число спинов в двумерной электронной системе, оказывается порядка нескольких миллионов, что крайне мало для традиционных методов

детектирования спинового резонанса. Поэтому разработки новых резонансных методов, которые запланированы в рамках проекта, представляются крайне важными и актуальными.

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

Научный коллектив исполнителей НИР оснащен современными высокоточными измерительными приборами и комплексами (криостатами с магнитным полем, микроволновые генераторы и резонансные усилители), а также технологическим оборудованием (электронными и оптическими литографами), позволяющим изготавливать и проводить аттестацию новых функциональных материалов, создавать на их основе модельные образцы и производить их исследования во всем спектре условий, необходимых для дальнейшего практического применения.

Научный коллектив исполнителей при выполнении НИР будет использовать уникальные научные стенды и установки Распределенного центра коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук (РЦКП ИФТТ РАН).

Все основные методики РЦКП ИФТТ РАН, используемые для исследований структуры, фазового и химического состава, а также характеристики создаваемых структур, аттестованы и внесены в Федеральный реестр Методик выполнения измерений в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ФГУП «ВНИИМС»).



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *1.32.1 Разработка методики детектирования электронного спинового резонанса*

Исследование электронного спинового резонанса в низкоразмерных электронных системах представляет собой весьма сложную экспериментальную задачу, поскольку полное число спинов в двумерной электронной системе, оказывается порядка нескольких миллионов, что крайне мало для традиционных методов детектирования спинового резонанса. Поэтому в рамках проекта были разработаны новые резонансные методики, которые основаны на резонансном разогреве электронов и соответствующем изменении магнитопроводимости электронной системы в условиях парамагнитного резонанса. Для этой цели был разработан метод двойного синхронного детектирования, в котором помимо модуляции тока, который пропусклся через двумерный канал, также модулировалась (на более высокой частоте) мощность микроволнового излучения, поступающего на образец. Сигнал с первого синхронного детектора поступал на второй более высокочастотный синхронный усилитель, выход которого измерял амплитуду спинового резонанса.

#### *1.32.2 Электронный спиновый резонанс в полупроводниковых низкоразмерных структурах с двумерным электронным газом*

Исследован электронный спиновый резонанс в системе тяжелых фермионов, которая реализуется в квантовых ямах AlAs. Показано, что в этом случае ЭПР удастся детектировать не только в перпендикулярном, но и в параллельном магнитном поле. Обнаружена значительная анизотропия g-фактора двумерных электронов, которая приводит к расщеплению спинового

резонанса на два отдельных пика при ориентации поля вдоль направления [100]. Этот факт указывает на то, что в этой системе электроны заселяют две X-долины, в каждой из которых g-фактор является сильно анизотропным и имеет главные оси [100], [010] и [001]. Измерены все фундаментальные значения g-фактора.

### *1.32.3 Ферромагнитный резонанс в ферромагнитных слоях и гибридных структурах ферромагнетик-джозефсоновский переход*

С целью изучения прохождения микроволнового сигнала через гибридные метаматериалы и джозефсоновские структуры на основе многослойных структур сверхпроводник/ ферромагнетик разработана методика высокочувствительных низкотемпературных измерений ферромагнитного резонанса в тонких ферромагнитных пленках непосредственно на подложке. Плёнка ферромагнетика исследуемого материала осаждалась на центральный тонкопленочный проводник копланарной сверхпроводящей линии, что обеспечивало взаимодействие ферромагнетика с магнитным полем проходящей электромагнитной волны. Измерен ферромагнитный резонанс в тонкопленочных структурах из пермаллоя и слабого низкотемпературного ферромагнетика  $\text{Pd}_{99}\text{Fe}_{01}$  (с температурой Кюри 15 K), который используется при реализации магнитной джозефсоновской памяти.

Разработаны теоретические модели взаимодействующих (индуктивно-связанных) сверхвысокочастотных мод в ферромагнитных слоях и длинных джозефсоновских переходах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все пункты плана НИР ИФТТ РАН по теме «Электронный спиновый резонанс, спинзависящие электронные эффекты и спиновые технологии» на 2015 год выполнены полностью. Продемонстрированы возможности по использованию резонансных методов для исследования спиновых явлений в низкоразмерных гетероструктурах. С помощью электронного спинового резонанса измерены фундаментальные значения  $g$ -фактора в системе тяжелых фермионов в квантовых ямах AlAs. Разработана также методика высокочувствительных низкотемпературных измерений ферромагнитного резонанса в тонких ферромагнитных пленках и гибридных тонкопленочных структурах ферромагнетик – джозефсоновский переход.

В 2015 году получены следующие результаты:

1. Методами электронного спинового и ферромагнитного резонансов исследованы полупроводниковые и сверхпроводниковые гетероструктуры.
2. Измерены фундаментальные значения  $g$ -фактора в системе тяжелых фермионов в квантовых ямах AlAs, обнаружена значительная анизотропия  $g$ -фактора.
3. Разработана методика низкотемпературных измерений ферромагнитного резонанса в тонких ферромагнитных пленках и гибридных бислойных структурах сверхпроводник-ферромагнетик непосредственно на подложке.
4. Разработаны теоретические модели взаимодействующих сверхвысокочастотных мод, возникающих в ферромагнитных слоях и длинных джозефсоновских переходах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A. V. Shchepetilnikov, Yu. A. Nefyodov, I. V. Kukushkin, L. Tiemann, C. Reichl, W. Dietsche, W. Wegscheider  
“Electron  $g$ -factor anisotropy in an AlAs quantum well probed by ESR”  
PHYSICAL REVIEW B **92**, 161301(R) (2015)

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.911, 538.958, 537.62

ГР № 115121810053

Инв. № 11214-36/2115-93

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

« 26.01 » 2016 г.

**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий»  
(промежуточный)**

Научные руководители  
член-корр. РАН

М.И. Карпов

доктор физ.-мат. наук

А.С. Аронин

г. Черноголовка  
2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., д.т.н., член-корр. РАН	М.И.Карпов (Введение, 1.1. 6, заключение)
Зам. директора ИФТТ РАН	В.Д.Кулаковский (1.1.7)
Гл. н.с. д.ф.-м.н., член-корр. РАН	И.В.Кукушкин (1.1.3 )
Зав. лаб., д.ф.-м.н.	А.С.Аронин (1.1.1)
Зав. лаб., д.ф.-м.н.	В.В.Рязанов (1.1.4)
Зав. лаб., д.ф.-м.н.	А.А.Шашкин (1.1.5)

### Исполнители:

В.н.с., д.ф.-м.н	Г.Е.Абросимова (1.1.1)
В.н.с., д.ф.-м.н	В.Ю.Аристов (1.1.2)
В.н.с., д.ф.-м.н	В.Т.Долгополов (1.1.5)
с.н.с., к.ф.-м.н	Д.В.Матвеев (1.1.1)
с. н.с., к.ф.-м.н	А.Н.Чайка (1.1.2)
с.н.с. к.ф.-м.н	В.Н.Семенов (1.1.2)
с.н.с. к.ф.-м.н	В.М.Муравьев (1.1.3.)
с.н.с. к.ф.-м.н	А.А.Жуков (1.1.5)
с.н.с. к.ф.-м.н	В.П.Коржов (1.1.6)
с.н.с. к.т.н	В.И.Внуков (1.1.6)
с.н.с., к.ф.-м.н	С.С.Гаврилов ( 1.1.7)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 16 страниц, 2 источника

*Ключевые слова:* НАНОСТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОВЕРХНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ, ПЛАЗМЕННЫЕ И МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ, КРАЕВЫЕ СОСТОЯНИЯ,

*Объектом исследования* в рамках Программы РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий» являются материалы разного типа: аморфные сплавы, нанокристаллические материалы, полупроводники, материалы с NbN – HgTe квантовыми ямами и др.

*Целью работы является* установление фундаментальных закономерностей формирования наноструктуры, определение принципов их образования, корреляции атомной и электронной структуры со свойствами материалов.

*Результаты работы:*

- получены новые наноматериалы с высокой индукцией насыщения;
- проведена симуляция СТМ-изображений упорядоченной тонкой пленки силицида гадолиния  $\text{GdSi}_{2-x}/\text{Si}(111)$  с учетом реалистичной структуры острия зонда;
- исследованы дисперсия плазменных и магнитоплазменных возбуждений в двумерных электронных системах с близкорасположенным задним затвором;
- исследован транспорт между металлом со сверхпроводящим параметром порядка и краевым состоянием, возникающим на краю 8-нм квантовой ямы HgTe с инверсией зон;
- исследована возможность управления состояниями резонансно возбужденных экситонных поляритонов в трехмерной ловушке,

изготовленной в планарном микрорезонаторе с высокой добротностью, обеспечивающем острый резонанс;

- получены новые жаропрочные материалы.

### *Область применения*

Полученные в ходе выполнения НИР в 2015 году фундаментальные результаты могут быть использованы в авиационном двигателестроении, авиастроении, создании магнитных сенсоров и постоянных магнитов для широкого спектра применений, развитии материалов для спецтехники. Указанные области применения объясняют высокую экономическую эффективность и значимость проведенных работ, поскольку, несмотря на весьма скромные объёмы финансирования, полученные фундаментальные результаты станут основой прорывных технологий в целом ряде областей современной техники.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
Основная часть.....	9
Важнейшие результаты исследований.....	9
1.1.1 Образование нанокристаллов из аморфной фазы.....	9
1.1.2. Исследование структуры поверхности полупроводников.....	9
1.1.3. Дисперсия плазменных и магнитоплазменных возбуждений.....	10
1.1.4. Краевые состояния в $NbN - HgTe$ квантовых ямах.....	10
1.1.5. Электростатическая нанолитография в полимерах с использованием атомно-силового микроскопа.....	11
1.1.6. Жаропрочные сплавы системы $Nb-Si-Ti-Zr-Hf-Cr-Al-Mo-Y$ .....	11
1.1.7. Электро-оптический контроль поляритонных состояний в трехмерной ловушке в планарном микрорезонаторе.....	12
Заключение.....	13
Список источников.....	16

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
ОЦК	Объемно-центрированная кубическая
ПММА	Полиметилметакрилат

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по Программе РАН «I.1П Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

В настоящее время наноматериалы находят свое применение в различных областях. Создание и развитие современных технологий опирается на фундаментальные исследования. Разработка принципов получения новых материалов базируется на знаниях фундаментальных основ процессов, обуславливающих формирование того или иного материала, а также корреляции структуры и определяемых ею физико-химических свойств. Поскольку большинство физико-химических свойств являются структурно-чувствительными, прогресс в создании новых материалов с определенными свойствами зависит от уровня понимания процессов, лежащих в основе формирования той или иной структуры. Открытие и разработка новых материалов определяет и новые физические свойства, и, в свою очередь, приводит к созданию новых приборов и устройств. К таким новым материалам, несомненно, наноматериалы.

Работы 2015 г. основаны на существующем в ИФТТ РАН научном заделе, квалификации исследователей, существующем уникальном оборудовании, частично разработанном в стенах института. Большинство полученных в

работе результатов являются принципиально новыми. Исследования в рамках данной темы тесно связаны с работами по другим темам плана ИФТТ РАН.

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В исследованиях использовались современные методы создания и исследования материалов (наноитография, скоростная закалка расплавов со скоростью  $10^6$  К/мин и др.). Основными методами исследования были рентгеноструктурный анализа, растровая, просвечивающая и высокоразрешающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, туннельная микроскопия, дифференциальный термический анализ, методы оптической спектроскопии.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *1.1.1 Образование нанокристаллов из аморфной фазы*

Установлено, что в процессе пластической деформации в аморфной фазе системы Fe-Si-B происходит образование нанокристаллов твердого раствора кремния в ОЦК железе.

- Определены гистерезисные магнитные характеристики образцов после нанокристаллизации при деформации. Показано, намагниченность насыщения образцов увеличивается на 40%, коэрцитивная сила увеличивается с 1.7 Э до 2.6 Э.

- Обнаружено, что проведение дополнительной термообработки (после деформирования) позволяет улучшить магнитно-мягкие характеристики деформированных образцов. Определены температурно-временные интервалы термообработок сплава, не приводящие к его дополнительной кристаллизации. В определенных интервалах проведены термообработки и затем измерены значения коэрцитивной силы и намагниченности насыщения. Установлено, что последовательные отжиги уменьшили коэрцитивную силу от 2.6 до 2.0 Э без ухудшения остальных характеристик.

#### *1.1.2 Исследование структуры поверхности полупроводников*

Проведена симуляция СТМ-изображений упорядоченной тонкой пленки силицида гадолиния  $\text{GdSi}_{2-x}/\text{Si}(111)$  с учетом реалистичной структуры острия зонда. Расчеты выполнены для ориентированных вдоль направления [110] вольфрамовых зондов с атомом вольфрама и кислорода на острие при различных величинах туннельного напряжения и сопротивления туннельного промежутка. Анализ экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов показывает, что наиболее достоверная информация о структуре поверхности и приповерхностных слоев силицида гадолиния может быть получена при использовании чистого зонда  $\text{W}[110]$ , малых туннельных напряжениях и расстояниях «зонд—поверхность».

### *1.1.3 Дисперсия плазменных и магнитоплазменных возбуждений*

Методом оптического детектирования исследованы дисперсия плазменных и магнитоплазменных возбуждений в двумерных электронных системах с близкорасположенным задним затвором. В образцах в форме дисков впервые экспериментально наблюдались как циклотронное, так и краевое экранированные магнитоплазменные возбуждения. Установлено, что магнитополевое поведение обеих мод хорошо согласуется с существующей теорией, описывающей дисперсию экранированных магнитоплазменных возбуждений. Показано, что в сильном магнитном поле дисперсия экранированных магнитоплазменных возбуждений имеет квадратичный характер. Это позволяет поставить в соответствие магнитоплазменной волне квазичастицу с массой, обладающей целым рядом уникальных свойств.

### *1.1.4 Краевые состояния в NbN – HgTe квантовых ямах*

Проведены исследования транспорта между металлом со сверхпроводящим параметром порядка (NbN, отличающийся высоким критическим полем более 14 Т) и краевым состоянием возникающим на краю 8-нм квантовой ямы HgTe с инверсией зон. Экспериментально продемонстрировано, что проводимость при напряжениях менее сверхпроводящей щели, демонстрирует эквидистантные по напряжению осцилляции. Эти осцилляции наблюдаются только при температурах менее 1 К. Они полностью подавляются в магнитных полях, нормально ориентированных по отношению к плоскости двумерной системы, но практически нечувствительны к магнитному полю, ориентированному в плоскости двумерной системы вплоть до 14 Т. Такое поведение и сравнение с теоретическими предсказаниями (Phys. Rev. B 82, 081303(R) (2010)) свидетельствует о геликоидальной природе краевого состояния.

### *1.1.5 Электростатическая нанолитография в полимерах с использованием атомно-силового микроскопа*

Проведена предварительная калибровка скорости накопления заряда тонкого (40 нм) слоя ПММА, облученного ионами Ga. Установлено, что характерные времена накопления заряда в облученном полимере практически совпадают с временами для исходного полимера. Показано, что как и в случае измерения работы выхода интеркалированных углеродных нанотрубок, наличие тонкого слоя воды на поверхности образца является критичным.

### *1.1.6 Жаропрочные сплавы системы Nb-Si-Ti-Zr-Hf-Cr-Al-Mo-Y*

На примере сплавов системы Nb-Si-Ti-Zr-Hf-Cr-Al-Mo-Y трех составов, отличавшихся только соотношением содержания молибдена и титана: 13 ат.% Ti + 8,5 ат.% Mo; 15 ат.% Ti, + 6,5 ат.% Mo; 17 ат.% Ti + 4,5 ат.% Mo показано, что увеличение содержания молибдена и снижение содержания титана в указанных пределах приводит к росту кратковременной прочности при 1300 и 1350°C от 707 до 950 МПа и от 433 до 562 МПа соответственно. Скорость деформации ползучести при 1300°C и напряжении 200 МПа при этом снижается с  $10,6 \cdot 10^{-3}$  до  $9,8 \cdot 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>. Показано, что при диффузионной сварке в вакууме при температуре 1020 °C многослойного композита, состоящего из чередующихся слоев сплава титана (Ti<sub>80</sub>Zr<sub>10</sub>Nb<sub>5</sub>Mo<sub>5</sub>ат%) толщиной 170 мкм, и слоев алюминия толщиной 65 мкм на месте слоев алюминия возникает структура состоящая из комплекса слоев интерметаллидов Ti<sub>3</sub>Al –TiAl- Ti<sub>2</sub>Al и соответствующих двухфазных слоев между ними. При испытании на изгиб при 700°C достигнуто значение прочности 1350 МПа. При диффузионной сварке композита, состоящего из чередующихся слоев ниобия толщиной 110 мкм и сплава алюминия (Al-1% масс.Si) толщиной 50 мкм в результате диффузии атомов ниобия в слои алюминия на месте последних происходит образование новой слоистой интерметаллидной структуры, состоящей из последовательности (от слоя

ниобия к центру слоя алюминия):  $(\text{Nb-Nb}_3\text{Al}) - \text{Nb}_3\text{Al} - (\text{Nb}_3\text{Al} + \text{Nb}_2\text{Al}) - \text{Nb}_2\text{Al}$ . Образование подобной структуры связано с более высокой диффузионной подвижностью атомов ниобия в алюминии в условиях реактивной диффузии. При испытании на изгиб при комнатной температуре этих образцов достигнуто значение прочности 1550 МПа, при температуре 1300°C кратковременная прочность составила 680 МПа, сто-часовая прочность при этой температуре составила 24,2 МПа. Это рекордные значения для композитов этого типа и для сплавов ниобия, упрочненных интерметаллидами ниобия.

#### *1.1.7 Электро-оптический контроль поляритонных состояний в трехмерной ловушке в планарном микрорезонаторе.*

Исследована возможность управления состояниями резонансно возбужденных экситонных поляритонов в трехмерной ловушке, изготовленной в планарном микрорезонаторе с высокой добротностью ( $Q \sim 6000$ ), обеспечивающем острый резонанс. Показано, что при помещении ловушки в  $i$ -область  $p$ - $i$ - $n$  перехода для управления энергией поляритонов в ловушке можно использовать эффект Штарка, при этом экспериментально реализована вариация энергии поляритона в пределах 10 мэВ. Далее найдено, что в такой конфигурации для измерения энергии поляритонов в ловушке можно использовать измерение фототока в  $p$ - $i$ - $n$  структуре. Показано также, что, используя тот факт, что фототок резко возрастает при резонансе энергии поляритона с частотой накачки, измерения фототока можно использовать и для фиксации величины фиолетового сдвига поляритонного состояния с ростом концентрации поляритонов  $N$  в ловушке обусловленного отталкивательным взаимодействием поляритонов  $\Delta E = VN/S$ , где  $V$  – константа поляритон-поляритонного взаимодействия и  $S$  - площадь ловушки. Найдено, что в ловушке диаметром 2 мкм фиолетовый сдвиг при увеличении числа поляритонов составлял 0.02 мэВ/поляритон при ширине поляритонного резонанса  $\sim 1$  мэВ.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. В 2015 г. был выполнен комплекс исследований, нацеленных на выявление закономерностей структуры и свойств наноматериалов. В 2015 году получены следующие основные результаты:

1. Методом интенсивной пластической деформации аморфного сплава Fe-Si-V сформирована нанокристаллическая структура и показано, что при ее образовании намагниченность насыщения увеличивается на 40%, коэрцитивная сила увеличивается с 1.7 Э до 2.6 Э. Проведение дополнительной термообработки позволяет уменьшить коэрцитивную силу от 2.6 до 2.0 Э без ухудшения остальных характеристик.
2. Проведена симуляция СТМ-изображений упорядоченной тонкой пленки силицида гадолиния  $\text{GdSi}_{2-x}/\text{Si}(111)$  с учетом реалистичной структуры острия зонда. Установлено, что наиболее достоверная информация о структуре поверхности и приповерхностных слоев может быть получена при использовании чистого зонда W[110], малых туннельных напряжениях и расстояниях «зонд—поверхность».
3. Исследованы дисперсия плазменных и магнитоплазменных возбуждений в двумерных электронных системах с близкорасположенным задним затвором. Показано, что в сильном магнитном поле дисперсия экранированных магнитоплазменных возбуждений имеет квадратичный характер. Это позволяет поставить в соответствие магнитоплазменной волне квазичастицу с массой, обладающей целым рядом уникальных свойств.
4. Исследован транспорт между металлом со сверхпроводящим параметром порядка и краевым состоянием, возникающим на краю 8-нм квантовой ямы  $\text{HgTe}$  с инверсией зон. Экспериментально продемонстрировано, что проводимость при напряжениях менее сверхпроводящей щели, демонстрирует эквидистантные по напряжению осцилляции, которые полностью подавляются в магнитных полях, нормально ориентированных по

отношению к плоскости двумерной системы, но практически нечувствительны к магнитному полю, ориентированному в плоскости двумерной системы вплоть до 14 Т.

5. Проведена предварительная калибровка скорости накопления заряда тонкого (40 нм) слоя ПММА, облученного ионами Ga. Установлено, что характерные времена накопления заряда в облученном полимере практически совпадают с временами для исходного полимера.

6. На примере сплавов системы Nb-Si-Ti-Zr-Hf-Cr-Al-Mo-Y трех составов показано, что увеличение содержания молибдена и снижение содержания титана в указанных пределах приводит к росту кратковременной прочности при 1300 и 1350°C от 707 до 950 МПа и от 433 до 562 МПа, соответственно. При испытании на изгиб при комнатной температуре достигнуты рекордные значения для композитов этого типа и для сплавов ниобия, упрочненных интерметаллидами ниобия.

7. Исследована возможность управления состояниями резонансно возбужденных экситонных поляритонов в трехмерной ловушке, изготовленной в планарном микрорезонаторе с высокой добротностью, обеспечивающем острый резонанс. Показано, что при помещении ловушки в i-область p-i-n перехода для управления энергией поляритонов в ловушке можно использовать эффект Штарка, при этом экспериментально реализована вариация энергии поляритона в пределах 10 мэВ.

Задачи, поставленные в госзадании ИФТТ РАН, полностью решены. Полученные результаты находятся на мировом уровне или даже его несколько опережают. Об этом свидетельствует участие в исследованиях партнеров из ведущих зарубежных научных учреждений, представление результатов на международных научных конференциях и публикация полученных данных в ведущих международных журналах. Полученные фундаментальные результаты станут основой прорывных технологий в целом ряде областей современной техники. Важность полученных

результатов обуславливает необходимость продолжения указанных исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Коржов В.П., М.И. Карпов, И.С. Желтякова «Изменение структуры и жаропрочность многослойного титан-алюминиевого композита, полученного диффузией в твердой фазе. Changes in the structure and heat resistance of multilayer titanium-aluminum composite obtained by diffusion in solid phase.» Scientific Proceedings of the Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering, Year XXIII, Vol. 22/185, September 2015, p. 104108.
- 2 Коржов В.П., В.М. Кийко «Структура и механические свойства слоистых композитов Ni/Al с упрочнением интерметаллидами». Деформация и разрушение материалов, №6, 2015, с. 611

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.915, 538.931

ГР № 115121810058

Инв. № 11214-36/2115-97

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор ИФТТ РАН**

**член-корр. РАН**

**В.В. Кведер**



**» 2016 г.**

**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**






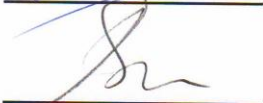

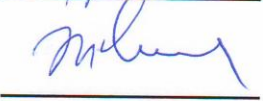

**«Актуальные проблемы физики низких температур» (промежуточный)**

**Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук**

**С.Е. Бредихин**

**г. Черноголовка  
2016**

# СПИСОК ОТВЕТСТВЕННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Заведующий лабораторией Доктор физ.-мат. наук, доцент		С.И. Бредихин (Общая редакция, Введение, заключение, раздел 1.7)
Заведующий лабораторией Доктор физ.-мат. наук		А.А. Левченко (раздел 1.1)
Заведующий лабораторией Чл.-корр. РАН		В.Д. Кулаковский (раздел 1.2)
Заведующий лабораторией Доктор физ.-мат. наук		В.В. Рязанов (раздел 1.3)
Главный научный сотрудник Доктор физ.-мат. наук		В.Т. Долгополов (раздел 1.4)
Ведущий научный сотрудник Доктор физ.-мат. наук		В.Н. Зверев (раздел 1.5)
Старший научный сотрудник Канд. физ.-мат. наук		А.А. Максимов (раздел 1.6)
Ведущий научный сотрудник Доктор физ.-мат. наук		Э.А. Штейнман (раздел 1.8)
Инженер-патентовед Нормоконтроллер		И.А. Карпова (общее оформление)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 19 страниц, 1 источник

*Ключевые слова:* МЕЗОСКОПИЧЕСКАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, КВАНТОВЫЕ ЖИДКОСТИ, КРИСТАЛЛЫ И ГАЗЫ; НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ МАГНЕТИЗМ, ЭЛЕКТРОННЫЙ И СПИНОВЫЙ КВАНТОВЫЙ ТРАНСПОРТ, КВАНТОВО-КОГЕРЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ, НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ.

*Целями работы являются* исследования по наиболее перспективным и бурно развивающимся направлениям фундаментальных исследований в области современной квантовой физики и, прежде всего, по тем направлениям, которые связаны с проявлением квантовых явлений в системах промежуточного (мезоскопического) пространственного масштаба. Квантовые явления, микроскопические по своей природе, при определенных условиях проявляются в поведении систем с очень большим числом частиц. Хорошо изученными примерами являются сверхпроводимость при низких температурах и сверхтекучесть объёмного гелия. В то же время существует намного более широкий круг квантовых явлений, проявляющихся в системах промежуточных (между «атомным» и «макроскопическим» диапазоном) размеров. Такие системы, с типичными размерами от долей микрона до десятков микрон, называют «мезоскопическими».

*Результаты работы:*

– в образцах твердого гелия, выращенных методом блокированного капилляра, были измерены полевые и температурные зависимости. Применение источников на основе углеродных нанотрубок позволило впервые наблюдать движение положительных зарядов в образцах твердого тела при температурах ниже 0,1К. Вольтамперная характеристика может быть описана степенной функцией  $I \sim U^\alpha$ , с показателем степени  $\alpha \gg 2$ , много больше, чем можно ожидать для токов, ограниченных объемными зарядами;

- экспериментально установлено, что устойчивость поверхности сверхтекучего гелия зависит от степени проницаемости стенок для нормальной компоненты. Показано, что в случае попарно проницаемых стенок критическая мощность, при которой наблюдается неустойчивость, растет с повышением температуры, что противоположно понижению при полностью непроницаемых стенках;
- изучены корреляции между интенсивностями рекомбинационного излучения двумерного электронного газа, измеренными в различных точках образца при наличии гигантских флуктуаций люминесценции в режиме Квантового Эффекта Холла. Установлено, что в этих условиях длина корреляции, отвечающая за когерентное поведение флуктуаций интенсивностей излучения, измеренных в различных точках образца, составляет 3 мм и уменьшается при повышении температуры, обращаясь в ноль при температуре 1,9К;
- исследован спектр шумов в условиях гигантских флуктуаций и показано, что он содержит несколько частот, которые соотносятся как числа Фибоначчи;
- изготовлены высокоподвижные квантовые ямы на основе SiGe. Решены проблемы, связанные с изготовлением затвора и контактов к образцам. Подвижность двумерных электронов в образцах SiGe превышает почти на два порядка подвижности в аналогичных двумерных электронных системах МОП-структур кремния. Исследованы транспортные свойства образцов SiGe.
- Впервые выполнены прямые измерения пикосекундной кинетики нагрева спиновой подсистемы ионов Mn в полумагнитных полупроводниковых гетероструктурах.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
Основная часть.....	10
1 Процесс теоретических и экспериментальных исследований.....	10
1.1 Турбулентность на поверхности и в объеме квантовых жидкостей и кристаллов .....	10
1.2 Исследование спиновых эффектов в Бозе-конденсатах экситонов и экситонных микрорезонаторных поляритонов_и когерентных электронных систем в новых полупроводниковых гетероструктурах .....	11
1.3 Исследование джозефсоновских внутренне-фрустрированных сетей и квантовых метаматериалов для реализации квантовых когерентных состояний.....	11
1.4 Кинетические процессы в мезоскопических системах с сильным взаимодействием.....	12
1.5 Переходы проводник-диэлектрик и сверхпроводник-диэлектрик в сильно коррелированных системах, склонных к зарядовому упорядочению.....	13
1.6 Механизмы спиновой релаксации в полумагнитных полупроводниковых гетероструктурах.....	14
1.7 Эффекты самоорганизации и особенности переноса заряда в смешанных ионно-электронных проводниках и композитах из наночастиц, органических и биоорганических молекул.....	15
1.8 Релаксация кристаллической решетки на дислокационных конфигурациях .....	15
Заключение.....	16
Список использованных источников.....	19

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
ВТСП	Высокотемпературные сверхпроводники
РЦКП ИФТТ РАН	Распределенный центр коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук
ФГУП «ВНИИМС»	Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы
МОП-структура	Металл-оксид-полупроводник
ЭПР	Электронный парамагнитный резонанс
ПЭМ	Просвечивающая электронная микроскопия

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году является План научно-исследовательской работы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Мезоскопические квантовые явления проявляются (как правило – при низких температурах) в искусственно созданных структурах малых размеров и в макроскопических телах, характеризующихся сильной неупорядоченностью на микромасштабах. Обнаруженные при исследовании таких систем проблемы носят фундаментальный характер, касающийся природы и закономерностей перехода от квантовых свойств микромира к классической физике макрообъектов. Для возможных приложений квантовой мезоскопии наиболее перспективными направлениями считаются в настоящее время работы по созданию элементной базы квантовой информатики, по разработке логических устройств и систем памяти на сверхпроводящих джозефсоновских сетках, а также по созданию высокоскоростной «углеродной» электроники на основе графена и нанотрубок.

Эффективность работ по Программе во многом определяется тем, что большинство институтов РАН, являющихся исполнителями Программы, имеют длительный и серьезный опыт работы по всем рассматриваемым проблемам. Блестящим началом этой деятельности в России можно считать открытие П.Л.Капицей явления сверхтекучести жидкого гелия в конце тридцатых годов прошлого века, за что в дальнейшем П.Л.Капице была присуждена Нобелевская премия. Природа сверхтекучести получила объяснение в теоретических работах Л.Д.Ландау, причем, в отличие от

длительной истории объяснения сверхпроводимости, на это понадобилось около двух лет, что характеризует подготовленность российской физической школы к восприятию новых идей и фактов уже в то время. Основы квантовой мезоскопической физики также закладывались в работах представителей школ П.Л.Капицы (эксперимент) и Л.Д.Ландау (теория). Их ученики и ученики их учеников во многих институтах РАН принимают эффективное участие в выполнении Программы.

Квантовая мезоскопическая физика в ее современном понимании является определяющей темой исследований для многих ведущих институтов РАН, таких как Институт физических проблем им. П.Л.Капицы, Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау, Институт физики твердого тела, Институт физики микроструктур и других. В части институтов РАН непосредственные исследования в этой области проводятся отдельными теоретическими и (или) экспериментальными группами. Из-за сложности и новизны проводимых фундаментальных исследований по Программе успех решения предлагаемых задач нельзя заранее прогнозировать. По этой причине программно-целевой метод реализации Программы с ежегодной коррекцией целей и задач Программы по результатам ее поэтапного выполнения представляется оптимальным

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

Научный коллектив исполнителей НИР оснащен современными высокоточными измерительными приборами и комплексами, а также технологическим оборудованием, позволяющим синтезировать и проводить аттестацию новых функциональных материалов, создавать на их основе модельные образцы и производить их исследования во всем спектре условий, необходимых для дальнейшего практического применения.

Научный коллектив исполнителей при выполнении НИР будет использовать уникальные научные стенды и установки Распределенного центра коллективного пользования Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук (РЦКП ИФТТ РАН).

Все основные методики РЦКП ИФТТ РАН, используемые для исследований структуры, фазового и химического состава, а также характеристики создаваемых структур, аттестованы и внесены в Федеральный реестр Методик выполнения измерений в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ФГУП «ВНИИМС»).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1 Процесс теоретических и экспериментальных исследований

#### *1.1 Турбулентность на поверхности и в объеме квантовых жидкостей и кристаллов*

Разработан метод изготовления эмиссионных источников зарядов на основе углеродных нанотрубок, пригодных для исследования механизмов движения инжектированных зарядов в образцах твердого тела при температурах ниже 1К. Источники были приготовлены осаждением нанотрубок из разряда на плоскую медную подложку или втиранием нанотрубок в пористый металл. Исследования вольтамперных характеристик источников, проведенные в сверхтекучем гелии, показали, что при напряжениях выше 120 Вольт можно наблюдать относительно большой ток отрицательных и положительных зарядов на уровне  $10^{-13}$  А.

В образцах твердого гелия, выращенных методом блокированного капилляра, были измерены полевые и температурные зависимости. Применение источников на основе углеродных нанотрубок позволило впервые наблюдать движение положительных зарядов в образцах твердого тела при температурах ниже 0,1К. Вольтамперная характеристика может быть описана степенной функцией  $I \sim U^\alpha$ , с показателем степени  $\alpha \gg 2$ , много больше, чем можно ожидать для токов, ограниченных объемными зарядами.

Экспериментально установлено, что устойчивость поверхности сверхтекучего гелия зависит от степени проницаемости стенок для нормальной компоненты. Показано, что в случае попарно проницаемых стенок критическая мощность, при которой наблюдается неустойчивость, растет с повышением температуры, что является противоположностью понижения критической мощности при полностью непроницаемых стенках.

## *1.2 Исследование спиновых эффектов в Бозе-конденсатах экситонов и экситонных микрорезонаторных поляритонов и когерентных электронных систем в новых полупроводниковых гетероструктурах*

Изучены корреляции между интенсивностями рекомбинационного излучения двумерного электронного газа, измеренными в различных точках образца при наличии гигантских флуктуаций люминесценции в режиме Квантового Эффекта Холла. Установлено, что в этих условиях длина корреляции, отвечающая за когерентное поведение флуктуаций интенсивностей излучения, измеренных в различных точках образца, составляет 3 мкм и уменьшается при повышении температуры, обращаясь в ноль при температуре 1,9К. Исследован спектр шумов в условиях гигантских флуктуаций и показано, что он содержит несколько частот, которые соотносятся как числа Фибоначчи.

## *1.3 Исследование джозефсоновских внутренне-фрустрированных сетей и квантовых метаматериалов для реализации квантовых когерентных состояний*

Разработана комбинированная технология совместного изготовления “классических” сверхпроводящих кубитов на основе субмикронных туннельных переходов Al-AlO<sub>x</sub>-Al и рi-контактов (инверторов сверхпроводящей фазы) на основе джозефсоновских ниобиевых структур. Реализованы и измерены потоковые кубиты, в том числе кубиты с встроенными инверторами сверхпроводящей фазы. С целью исследования квантовых центров проскальзывания фазы развита технология изготовления высокоомных тонких пленок нитрида ниобия (с толщиной 4-10 нм) и сверхпроводящих нанопроволок на их основе. Реализованы и охарактеризованы сверхпроводниковые наноструктуры на основе совершенных металлических нанопроволок меди и висмута. Путем плазмохимической обработки композитных мезопористых магнитных структур из сплава PdFe получены наноструктурированные объекты

(магнитные метаматериалы) с разветвленной поверхностью, имеющие металлический каркас с оксидом металла на поверхности. Предложена технология приготовления монокристаллических наночастиц (2-50 нм), получающихся в результате взрывной дезинтеграции при облучении мезопористых структур электронным пучком.

#### *1.4 Кинетические процессы в мезоскопических системах с сильным взаимодействием*

Изготовлены высокоподвижные квантовые ямы на основе SiGe. Решены проблемы, связанные с изготовлением затвора и контактов к образцам. Подвижность двумерных электронов в образцах SiGe превышает почти на два порядка подвижности в аналогичных двумерных электронных системах МОП-структур кремния. Исследованы транспортные свойства образцов SiGe. Разница на порядок величины между транспортным и квантовым временами релаксации указывает на длиннопериодный потенциальный рельеф. В то же время линейная зависимость проводимости от температуры указывает на присутствие короткопериодного потенциального рельефа в исследованных образцах.

При исследовании устойчивости волны зарядовой плотности с двумя пучностями в нанопроволоках InAs в присутствии подвижного затвора в магнитном поле обнаружено, что данные волны не разрушаются при приложении магнитного поля перпендикулярного оси проволоки, величина которого соответствует потоку, равному одному кванту потока, проходящему через горизонтальное сечение проволоки. Выполнен анализ диффузионного вклада в ток в нелинейном режиме в двумерной электронной системе геометрии Корбино в условиях квантового эффекта Холла. Сформулированы условия, когда этот вклад может быть существенным.

#### *1.5 Переходы проводник-диэлектрик и сверхпроводник-диэлектрик в сильно коррелированных системах, склонных к зарядовому упорядочению*



Проведены измерения поверхностного импеданса кристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.3}\text{La}_{0.7}\text{CuO}_8$  при  $T_c=25$  К и 10 К. Установлено, что в нормальном состоянии выполнялся критерий нормального скин-эффекта. При температуре, стремящейся к нулю, образец демонстрирует потери, соизмеримые с потерями в нормальном состоянии. На образцах при  $T_c=10$  К, средняя ширина сверхпроводящего перехода составляет 3 К, проводятся работы по улучшению этого параметра. Исследованы температурные зависимости верхнего критического магнитного поля  $H_{c2}(T)$  в монослойных гетероструктурах  $\text{La}_{1.65}\text{Sr}_{0.45}\text{CuO}_4 / \text{La}_2\text{CuO}_4$  в магнитных полях до 67Т. Обнаружено отклонение экспериментальной зависимости  $H_{c2}(T)$  от теоретической в модели БКШ.

Исследованы температурные зависимости магнитной глубины проникновения  $\lambda(T)$  в органических сверхпроводящих монокристаллах к- $(\text{BEDT-TTF})_2 \text{Cu} [\text{N}(\text{CN})_2] \text{Br}$ . Наблюдалась линейная зависимость  $\lambda(T)$ , что свидетельствует о d-волновой симметрии параметра порядка.

Проведено исследование катионного состава методом локального рентгеновского микроанализа и структуры методом высокого разрешения в ПЭМ керамических образцов  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$  (Eu-123). Выявлена катионная нестехиометрия фазы Eu-123 и ее зависимость от процедуры термообработки. Катионная нестехиометрия описывается в рамках гомологического ряда оксидов  $\text{Eu}_n\text{Ba}_m\text{Cu}_{m+n}\text{O}_y$  со структурой оксида Eu-123. Электронно-микроскопические изображения частиц исследованных образцов показывают, что все они имеют неоднородную структуру в виде существования доменов двух типов. Первый тип детектируется по неоднородному контрасту изображений высокого разрешения вдоль направления [001] в виде темных областей размерами от 1 до нескольких нанометров. Домены второго типа проявляются в виде существования на изображениях областей контраста с нечетким изображением кристаллической решетки размерами от 10 до 20 нм.

## *1.6 Механизмы спиновой релаксации в полумагнитных полупроводниковых гетероструктурах*

Подробно исследованы низкотемпературные спектры люминесценции с высоким временным разрешением до  $\sim 2$  пс с целью прямого измерения времени передачи энергии от фотовозбужденных носителей в полумагнитных полупроводниковых гетероструктурах второго типа на основе  $(\text{Zn,Mn})\text{Se}/(\text{Be,Mn})\text{Te}$  в магнитную подсистему ионов марганца. Измерения кинетики сдвига полосы экситонной люминесценции, выполняемые во внешних магнитных полях до 3 Т, позволяют реализовать безынерционный внутренний термометр магнитной подсистемы. При высоком уровне оптического возбуждения, при котором время жизни фотовозбужденных дырок в слое  $(\text{Zn,Mn})\text{Se}$  составляло  $\sim 40$  пс, было определено время их остывания за счет передачи энергии в Mn подсистему  $\sim 16$  пс.

Впервые выполнены прямые измерения пикосекундной кинетики нагрева спиновой подсистемы ионов Mn в полумагнитных полупроводниковых гетероструктурах

### *1.7 Эффекты самоорганизации и особенности переноса заряда в смешанных ионно-электронных проводниках и композитах из наночастиц, органических и биоорганических молекул.*

Обнаружено, что в многокомпонентных композициях из биополимеров (ДНК, коллаген, хитозан) и неорганических наночастиц возникают сильные межчастичные связи, отсутствующие в коллективах чистых компонентов. Это приводит к значительному преобладанию энтальпийного фактора над энтропийным, резко усиливающим кристаллизационные процессы, что можно трактовать как понижение эффективной температуры среды, т.е. композиционное охлаждение биополимеров. За счет этого многократно возрастают скорости формирования белковых и других биополимерных кристаллов, и усиливается их температурная стабильность, а также возрастает радиационная прочность органических материалов. Обнаруженные явления открывают возможности разработки новых методов биомедицинской диагностики и терапии, а также экономичных технологий устройств радиационной техники, микро- и оптоэлектроники.

### *1.8 Релаксация кристаллической решетки на дислокационных конфигурациях*

Изготовлены образцы с набором парамагнитных дефектов на основе дислокаций в изотопно-обогащенном кремнии посредством пластической деформации в разных условиях кристаллов  $^{29}\text{Si}$ . В. Методом эффекта Холла на постоянном токе проведено определение концентрации и подвижности свободных носителей тока в исследуемых образцах до и после деформации, изучены особенности спектров дислокационной фотолюминесценции, а также исследована температурная зависимость линий дислокационной люминесценции (ДЛ). Установлено, что в отличие от других полос люминесценции интенсивность линии D1 растет в интервале температур 20–32К. Кроме того, интегральная интенсивность линий в спектре ЭПР характеризуется немонотонностью в том же диапазоне от 20 до 32К, что и температурные зависимости линии D1 ДЛ. Предполагается, что симбатное

поведение спектров ЭПР и фотолюминесценции связано с участием в формировании спектров одних и тех же групп парамагнитных центров, наличие которых зависит от деформации кристаллов. Установлено, что по мере деформирования кристаллов температурная зависимость магнитного момента образца сменяется от закона Кюри–Вейсса к качественно иному виду, объясняемому антиферромагнитным взаимодействием между центрами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все пункты плана НИР ИФТТ РАН, выполняемые в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р, выполнены полностью. В 2015 году получены следующие результаты:

- 1 В образцах твердого гелия, выращенных методом блокированного капилляра, были измерены полевые и температурные зависимости. Применение источников на основе углеродных нанотрубок позволило впервые наблюдать движение положительных зарядов в образцах твердого тела при температурах ниже 0,1К. Вольтамперная характеристика может быть описана степенной функцией  $I \sim U^\alpha$ , с показателем степени  $\alpha \gg 2$ , много больше, чем можно ожидать для токов, ограниченных объемными зарядами.
- 2 Экспериментально установлено, что устойчивость поверхности сверхтекучего гелия зависит от степени проницаемости стенок для нормальной компоненты. Показано, что в случае попарно проницаемых стенок критическая мощность, при которой наблюдается неустойчивость, растет с повышением температуры, что является противоположностью понижения критической мощности при полностью непроницаемых стенках.
- 3 Изучены корреляции между интенсивностями рекомбинационного излучения двумерного электронного газа, измеренными в различных точках образца при наличии гигантских флуктуаций люминесценции в режиме Квантового Эффекта Холла. Установлено, что в этих условиях длина корреляции, отвечающая за когерентное поведение флуктуаций интенсивностей излучения, измеренных в различных точках образца, составляет 3 мм и уменьшается при повышении температуры, обращаясь в ноль при температуре 1,9К.

4 Исследован спектр шумов в условиях гигантских флуктуаций и показано, что он содержит несколько частот, которые соотносятся как числа Фибоначчи.

5 Изготовлены высокоподвижные квантовые ямы на основе SiGe. Решены проблемы, связанные с изготовлением затвора и контактов к образцам. Подвижность двумерных электронов в образцах SiGe превышает почти на два порядка подвижности в аналогичных двумерных электронных системах МОП структур кремния. Исследованы транспортные свойства образцов SiGe.

6 Впервые выполнены прямые измерения пикосекундной кинетики нагрева спиновой подсистемы ионов Mn в полумагнитных полупроводниковых гетероструктурах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Баженов А.В. Взаимодействие гидрида фуллерита  $C_{60}H_{42}$  с воздухом [Текст] / Баженов А.В., И.О. Башкин, М.Ю. Максимук, Т.Н. Фурсова, Л.В. Зорина, А.П. Моравский // Физика Твёрдого Тела. — 2015.— Т.57. — № 2. — СС. 353-357.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)

УДК 538.945

ГР № 115121810061

Инв. № 11214-36/2115-94

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

« 20.01. » 2016 г.



О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Теплофизика высоких плотностей энергии» (промежуточный)

Научный руководитель  
кандидат физ.-мат. наук

А.В. Пальниченко

г. Черноголовка  
2016



## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

с.н.с., к.ф.-м.н



А.В.Пальниченко (1.13.1)

### Исполнители:

с.н.с., к.ф.-м.н



О.М.Вяселев (1.13.1)

с.н.с., к.ф.-м.н



С.С.Хасанов (1.13.1)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 11 страниц, 1 источник

*Ключевые слова:* УДАРНО-ВОЛНОВОЕ СЖАТИЕ, СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, ДИНАМИЧЕСКАЯ МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ, ИНТЕРФЕЙС  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$

*Объектом исследования* в рамках темы «Теплофизика высоких плотностей энергии» были металлооксидные смеси  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , подвергнутые ударно-волновому сжатию до  $\approx 100$  ГПа.

*Целью работы* было выяснение возможности возникновения и исследование сверхпроводимости в таких объектах при температурах, существенно превышающих температуру сверхпроводящего перехода,  $T_c = 1.2$  К, металлического алюминия.

В исследованиях использовались современные методы воздействия ударно-волновым сжатием на исследуемые образцы до давлений  $\approx 100$  ГПа.

Полученные таким образом образцы исследовались методами измерений динамической магнитной восприимчивости в различных внешних переменных и постоянных магнитных полях, а также рентгеновской и электронной дифракции.

*В результате работы* в образцах металлооксидной смеси  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , подвергнутых ударно-волновому сжатию до  $\approx 17$  ГПа, была выявлена сверхпроводимость при температуре  $T_c \approx 37$  К. Магнитометрические и структурные исследования указывают на то, что сверхпроводимость таких образцов возникает в пограничном слое (интерфейсе) между фазами металлического алюминия и его оксида  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### *Область применения*

Полученные фундаментальные результаты могут быть использованы при разработке новых перспективных высокотемпературных сверхпроводников, находящихся применение в областях энергетики и микроэлектроники.

Важность полученных результатов обуславливает положительный прогноз для продолжения указанных исследований.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
Основная часть.....	9
Важнейшие результаты исследований.....	9
<i>I.13.П Теплофизика высоких плотностей энергии.....</i>	<i>9</i>
Заключение.....	10
Список источников.....	11

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
-----	---------------------------------

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Теплофизика высоких плотностей энергии» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Сверхпроводящие материалы используются в различных отраслях энергетики и микроэлектроники. Поэтому исследование явления сверхпроводимости, направленное на получение новых высокотемпературных сверхпроводников, является актуальной задачей.

Интерфейсная сверхпроводимость представляет собой явление сверхпроводимости в межфазном слое, образованном фазами (веществами), не являющимися сверхпроводниками в отдельности, или переходящими в сверхпроводящее состояние при сравнительно низких температурах.

В настоящее время интерфейсная сверхпроводимость представлена разнообразными структурами, образующими новое семейство сверхпроводников. Например, сверхпроводимость может возникать в интерфейсах, образованных двумя изоляторами  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ ,  $T_C = 0.2$  К, (N.Reyren *et al.* Science, 317(2009)1196), металлом и изолятором  $\text{La}_{1.55}\text{Sr}_{0.45}\text{CuO}_4/\text{La}_2\text{CuO}_4$ ,  $T_C = 50$  К, (A. Gozar *et al.* Nature, 455(2008)782), или металлом и полупроводником  $\text{Pt/Si}$ ,  $T_C = 0.6$  К, (P.-C. Kuo *et al.* Appl. Phys. Lett., 104(2014)211604).

В 2011 году нами были получены сверхпроводящие металлооксидные интерфейсы  $\text{Al/Al}_2\text{O}_3$ , переходящие в сверхпроводящее состояние при сравнительно высокой температуре  $T_C = 45$  К. С помощью сравнительных

магнитометрических измерений было установлено, что сверхпроводящие Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> интерфейсы представляют собой межфазный слой, образованный слабо связанными между собой сверхпроводящими гранулами.

Эти Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> интерфейсы создавались нами путем поверхностного окисления образцов металлического алюминия в атмосфере кислорода, последующей вакуумной термообработки и закалки вакуумированных образцов до температуры жидкого азота.

Необходимость скоростной закалки образцов до низких температур, приводящая к сохранению их сверхпроводящих свойств в метастабильном состоянии, стимулировала в 2015 году исследование возможности получения сверхпроводящих Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> интерфейсов методом ударно-волнового сжатия металлооксидной смеси Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В результате работы были получены сверхпроводящие интерфейсы Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, переходящие в сверхпроводящее состояние при  $T_C \approx 37$  К.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *1.13 Теплофизика высоких плотностей энергии*

С помощью измерений динамической магнитной восприимчивости выявлена сверхпроводимость при температуре  $\approx 37$  К в образцах металлооксидной смеси Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, подвергнутых ударно-волновому сжатию до  $\approx 17$  ГПа .

Магнитометрические измерения, проведенные в температурном интервале  $4.2 \text{ К} \leq T \leq 80 \text{ К}$  в различных постоянных и переменных магнитных полях, а также рентгеноструктурные исследования указывают на то, что сверхпроводимость возникает в пограничном слое между фазами металлического алюминия и его оксида  $\alpha$ - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Обнаружено, что исследованные сверхпроводники являются неустойчивыми при комнатной температуре, в то время как хранение образцов при температуре жидкого азота (77 К) позволяет стабилизировать их сверхпроводящие свойства в метастабильном состоянии.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Ниже приведены краткие выводы по результатам выполнения НИР. Был выполнен комплекс исследований, направленных на получение новых сверхпроводящих материалов на основе металлооксидных интерфейсов. В частности, методом ударно-волнового сжатия металлооксидных смесей Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были получены металлооксидные интерфейсы, переходящие в сверхпроводящее состояние при температуре  $\approx 37$  К. Полученные результаты важны как для развития понимания особенностей явления сверхпроводимости, так и для разработки новых высокотемпературных сверхпроводников.

Задачи, поставленные в госзадании ИФТТ РАН, полностью решены. Полученные результаты находятся на мировом уровне. Об этом свидетельствует обнародование результатов на интернациональных научных конференциях и публикация полученных данных в международном журнале. Полученные фундаментальные результаты могут использоваться в различных отраслях энергетики и микроэлектроники.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Пальниченко А.В., Д.В. Шахрай, В.В. Авдонин, О.М. Вяселев, С.С. Хасанов. журнал: "Superconductivity of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interface formed by shock-wave pressure" Physica C т.512, 2015, стр.6-11

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.958

ГР № 115121810060

Инв. № 11 214-36/2115-100

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор ИФТТ РАН**

**член-корр. РАН**

**В.В. Кведер**

**» 2016 г.**



**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Сверхчувствительные сенсоры и гигантское усиление полей  
оптическими метаматериалами» (промежуточный)**

**Научный руководитель  
член-корр. РАН**

**И.В. Кукушкин**

**г. Черноголовка  
2016**

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Ответственные исполнители  
Гл. н.с., член-корр. РАН



И.В. Кукушкин (Введение, 1.19  
заключение)

Исполнители:  
С.н.с., к.ф.-м.н.



А.Б. Ваньков (I.19)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 15 страниц, 1 источник

*Ключевые слова:*

МЕТАМАТЕРИАЛЫ, ГИГАНТСКОЕ УСИЛЕНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА, БИОСЕНСОРЫ, ПЛАЗМОННЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

*Объектом исследования* являются метаматериалы, изготовленные на основе наноструктурированных металлических и диэлектрических подложек, которые могут служить в качестве биосенсоров для детектирования микробов и вирусов.

*Целями работы являются:*

- Разработка и изготовление нано-структурированных метоматериалов (SERS-подложек), в которых коэффициент усиления сигнала неупругого рассеяния света достигает значений  $2 \times 10^7$ .
- Разработка и исследование свойств метоматериалов, в которых селективность по гигантскому усилению рамановского рассеяния обеспечивается геометрическими параметрами фотонных кристаллов в диэлектрических резонаторах.
- Разработка и изготовление нано-структурированных метоматериалов (SERS-подложек), в которых гигантское усиления сигнала неупругого рассеяния света обеспечивалось в широком диапазоне частот.
- Разработка методов детектирования лекарственных комплексов на основе водорастворимых производных фуллеренов C<sub>60</sub> в биологических объектах по гигантскому усилению рамановского рассеяния.

### *Результаты работы:*

- Разработаны и изготовлены нано-структурированные метоматериалы (SERS-подложки), в которых коэффициент усиления сигнала неупругого рассеяния света достигает значений  $2 \times 10^7$ .
- Разработаны и исследованы свойства метоматериалов, в которых селективность по гигантскому усилению рамановского рассеяния обеспечивается геометрическими параметрами фотонных кристаллов в диэлектрических резонаторах.
- Разработаны и изготовлены нано-структурированные метоматериалы (SERS-подложки), в которых гигантское усиления сигнала неупругого рассеяния света обеспечивается в широком диапазоне частот.
- Разработаны методы детектирования лекарственных комплексов на основе водорастворимых производных фуллеренов C<sub>60</sub> в биологических объектах по гигантскому усилению рамановского рассеяния.

### *Область применения*

В ходе выполнения НИР в 2015 году получены результаты перспективные для разработки нового класса биосенсоров, необходимых для детектирования микробов и вирусов.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
Основная часть .....	10
1.19.1. Разработка и изготовление нано-структурированных метоматериалов (SERS-подложек) с рекордным коэффициентом усиления сигнала неупругого рассеяния света.....	10
1.19.2. Разработка и исследование свойств метоматериалов, в которых селективность по гигантскому усилению рамановского рассеяния обеспечивается геометрическими параметрами фотонных кристаллов в диэлектрических резонаторах.....	10
1.19.3. Разработка и изготовление нано-структурированных метоматериалов (SERS-подложек), в которых гигантское усиления сигнала неупругого рассеяния света обеспечивалось в широком диапазоне частот.....	11
1.19.4. Разработка методов детектирования лекарственных комплексов на основе водорастворимых производных фуллеренов C <sub>60</sub> в биологических объектах по гигантскому усилению рамановского рассеяния.....	12
Заключение .....	14
Список использованных источников.....	15

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
SERS	Гигантское усиление рамановского рассеяния
РЦКП ИФТТ РАН	Распределительный центр коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твёрдого тела Российской академии наук
ФГУП «ВНИИМС»	Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы
ГКР	Гигантское комбинационное рассеяние



## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме № 1.19. «Сверхчувствительные сенсоры и гигантское усиление полей оптическими метаматериалами» (0019-2015-0011) является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р. В текущем году был разработан и получен новый тип подложек, которые могут быть использованы в медицине и в биофизике в качестве биосенсоров для детектирования бактерий и вирусов.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Методы оптической спектроскопии играют все большую роль в медицине и в биофизике, и при этом на первый план выходят задачи идентификации органических молекул и микроорганизмов при аномально низких концентрациях. Рамановская спектроскопия, которая позволяет однозначно распознавать органические молекулы по спектрам неупругого рассеяния света, благодаря возбуждению большого количества разных специфических колебательных и вращательных мод, как нельзя лучше подходит для этих целей. Основная проблема непосредственного использования рамановских методов для анализа микро- и нано- доз органических веществ состоит в малом сечении рассеяния света на молекулярных возбуждениях. Однако, явление гигантского усиления рамановского рассеяния (SERS), обнаруженное на наноструктурированных металлических подложках, обеспечивает увеличение сигнала неупругого рассеяния света в миллионы раз, что делает возможным применение рамановских методов в практике,

например, в медицине. Высокая чувствительность SERS-методов достигается за счет усиления электромагнитного поля вблизи поверхности наноструктурированных металлических подложек благодаря резонансному возбуждению коллективных поверхностных плазмон-поляритонных мод. Для достижения одномолекулярной чувствительности рамановских методов требуется дальнейшее усиление локального электромагнитного поля и для этого необходимо использовать не только плазменный резонанс, реализующийся в металлических наноструктурах, но и комбинированное воздействие, в котором используется также диэлектрический резонанс, возникающий в диэлектрических метаматериалах. Примером гигантского усиления электромагнитного поля в диэлектрических структурах могут служить брэгговские зеркала, в которых реализуется усиление локального поля в тысячи раз. Сочетание плазменных и диэлектрических резонансов в комбинированных метаматериалах может обеспечить контролируемое усиление рамановского сигнала на 8 - 10 порядков, что обеспечит одномолекулярную чувствительность метода неупругого рассеяния света.

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИИР*

Научный коллектив исполнителей НИИР оснащен современными высокоточными измерительными приборами и комплексами (лазерами, спектрометрами, охлаждаемыми ССД-матрицами), а также технологическим оборудованием (электронными и оптическими литографами), позволяющим изготавливать и проводить аттестацию новых функциональных материалов, создавать на их основе модельные образцы и производить их исследования во всем спектре условий, необходимых для дальнейшего практического применения.

Научный коллектив исполнителей при выполнении НИИР будет использовать уникальные научные стенды и установки Распределенного

центра коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук (РЦКП ИФТТ РАН).

Все основные методики РЦКП ИФТТ РАН, используемые для исследований структуры, фазового и химического состава, а также характеристики создаваемых структур, аттестованы и внесены в Федеральный реестр Методик выполнения измерений в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ФГУП «ВНИИМС»).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Процесс теоретических и экспериментальных исследований

*1.19.1. Разработка и изготовление нано-структурированных метоматериалов (SERS-подложек), с рекордным коэффициентом усиления сигнала неупругого рассеяния света.*

Разработаны и изготовлены возобновляемые SERS-подложки, имеющие в диапазоне длин волн возбуждающего лазера от 405 нм до 830 нм коэффициент усиления сигнала неупругого рассеяния света от  $5 \times 10^6$  до  $2 \times 10^7$  (в разных диапазонах длин волн используются подложки разного типа). Для этой цели использовались различные диэлектрические материалы (кварц, сапфир, окись цинка, нитрид галлия и др.) с разными величинами действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости, а также различные металлы (серебро, золото, платина, титан, алюминий и др.).

*1.19.2. Разработка и исследование свойств метоматериалов, в которых селективность по гигантскому усилению рамановского рассеяния обеспечивается геометрическими параметрами фотонных кристаллов в диэлектрических резонаторах.*

Реализованы первые варианты комбинированных диэлектрических и металлических резонаторов с плавно изменяющимися геометрическими параметрами, что позволило исследовать свойства таких структур и выделить дополнительный вклад от диэлектрического резонатора в коэффициент усиления рамановского сигнала. В качестве диэлектрических резонаторов использовались периодические кварцевые структуры (столбики высотой 10 нм – 200 нм) с размером  $a$  (и периодом  $2a$ ), который изменялся в интервале от 50 нм до 1500 нм. Для создания комбинированного диэлектрического и

металлического резонатора на изготовленную периодическую диэлектрическую структуру методом термического напыления наносился наноструктурированный слой серебра. Такая комбинированная структура использовалась для измерений спектра неупругого рассеяния света с гигантским усилением и при этом использовались одномолекулярные слои различных органических молекул (4 типа различных молекул). Показано, что полученные ответы практически совпадали для всех исследованных веществ. Установлено, что если сравнивать сигналы, измеренные в областях с модулированной диэлектрической структурой и без нее, то при некоторых размерах периодической структуры удается получать дополнительное усиление почти на два порядка, что обеспечивает полное усиление рамановского рассеяния вплоть до  $2 \times 10^8$ .

*1.19.3. Разработка и изготовление нано-структурированных метоматериалов (SERS-подложек), в которых гигантское усиления сигнала неупругого рассеяния света обеспечивалось в широком диапазоне частот.*

Разработан и изготовлен новый тип SERS-подложек с широким спектром применения, которые практически одинаково эффективны в очень широком диапазоне длин волн лазерной накачки от 460 нм до 800 нм и имеют коэффициент усиления сигнала неупругого рассеяния света превышающий  $10^6$  во всем указанном диапазоне длин волн. Для достижения поставленной цели были применены интерференционные свойства коллективных плазменных мод, возникающие в многослойных металлических системах. Как следствие, в спектральных характеристиках подложек нового типа возникают дополнительные резонансы, которые и обеспечивают широкий диапазон применения созданных метаматериалов.

*1.19.4. Разработка методов детектирования лекарственных комплексов на основе водорастворимых производных фуллеренов C<sub>60</sub> в биологических объектах по гигантскому усилению рамановского рассеяния.*

Водорастворимые производные фуллеренов C<sub>60</sub> имеют широкий спектр биологической активности и перспективны с точки зрения создания на их основе эффективных лекарственных средств. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов детектирования таких наноструктур в биологических объектах. В современных исследованиях для детектирования различных органических соединений широко применяют УФ видимую спектроскопию и высокочувствительный метод флуоресценции. Однако фуллерены и их производные имеют слабое поглощение в видимой или в ближней УФ области спектра и практически не обладают флуоресценцией, что затрудняет их наблюдение традиционными спектральными методами. В то же время известно, что в силу уникальной сферической структуры углеродного каркаса фуллерены C<sub>60</sub> имеют характерный спектр рамановского рассеяния, состоящий преимущественно из одной высокоинтенсивной линии в области 1462–1469 см<sup>-1</sup>. В случае нанесения анализируемых молекул на поверхность серебряных или золотых наночастиц возникает эффект гигантского (поверхностно-усиленного) комбинационного рассеяния (ГКР, в англоязычной транскрипции – SERS), в результате интенсивность сигнала может усилиться на 5–6 порядков. В ряде случаев удастся регистрировать спектры ГКР отдельных молекул фуллеренов C<sub>60</sub>. Высокая чувствительность метода ГКР, сопоставимая с таковой метода флуоресценции, принципиально важна для исследования механизмов действия и фармакокинетики биологически активных соединений, которые находятся в биообъектах микро- и наномолярных количествах. На основании проведенных исследований можно сделать заключение, что изученные в данной работе водорастворимые производные фуллеренов, получаемые путем присоединения к фуллереновому сфероиду пяти катионных или

анионных аддендов, обладают хорошо регистрируемым спектром ГКР, что дает возможность их уверенно детектировать в водных растворах при концентрациях  $10^{-6}$  –  $10^{-5}$  М. Ковалентное присоединение к фуллереновому производному красителя позволяет регистрировать такие гибридные молекулярные структуры по высокоинтенсивному спектру ГКР красителя в диапазоне концентраций  $10^{-8}$  –  $10^{-5}$  М. Это открывает возможность широко использовать метод ГКР для исследования взаимодействия таких производных фуллеренов с биологическими структурами различного уровня организации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все пункты плана НИР ИФТТ РАН по теме № 1.19. «Сверхчувствительные сенсоры и гигантское усиление полей оптическими метаматериалами» (0019-2015-0011) на 2015 год выполнены полностью. В текущем году был разработан и получен новый тип подложек, которые могут быть использованы в медицине и в биофизике в качестве биосенсоров для детектирования бактерий и вирусов.

В 2015 году получены следующие результаты:

1. Разработаны и изготовлены нано-структурированные метоматериалы (SERS-подложки), в которых коэффициент усиления сигнала неупругого рассеяния света достигает значений  $2 \times 10^7$ .
2. Разработаны и исследованы свойства метоматериалов, в которых селективность по гигантскому усилению рамановского рассеяния обеспечивается геометрическими параметрами фотонных кристаллов в диэлектрических резонаторах.
3. Разработаны и изготовлены нано-структурированные метоматериалы (SERS-подложки), в которых гигантское усиления сигнала неупругого рассеяния света обеспечивается в широком диапазоне частот.
4. Разработаны методы детектирования лекарственных комплексов на основе водорастворимых производных фуллеренов C<sub>60</sub> в биологических объектах по гигантскому усилению рамановского рассеяния.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Полетаева Д.А., Е.А. Хакина, В.И. Кукушкин, А.Ю. Рыбкин, Н.С. Горячев, А.Ю. Белик, А.В. Жиленков, П.А. Трошин, Р.А. Котельникова, А.И. Котельников

«Применение метода гигантского комбинационного рассеяния света для детектирования водорастворимых производных фуллеренов и их ковалентных конъюгатов с красителями»,  
Доклады Академии Наук т. 460, 1-5 (2015)

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.91

ГР № 115121810056

Инв. № 11214-36/2MS-99

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор ИФТТ РАН**

**член-корр. РАН**

**В.В. Кведер**

**» 2016 г.**



**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Материя при высоких давлениях» (промежуточный)**

**Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук**

**В.Е. Антонов**

**г. Черноголовка  
2016**

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



В.Е.Антонов (Введение,  
1.34.2, заключение)

### Исполнители:

В.Н.С. д.ф.-м.н.



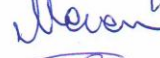
В.В.Синицын (I.34.1)

В.Н.С. д.ф.-м.н.



В.Ф.Дегтярева (I.34.2)

В.Н.С. д.ф.-м.н.



К.П.Мелетов (I.34.2)

С.Н.С. к.ф.-м.н



В.С.Ефимченко (I.34.1)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 11 страниц, 5 источников

*Ключевые слова:* ВЫСОКОЕ ДАВЛЕНИЕ, МОЛИБДАТЫ, ВОДОРОД, НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

*Объектами исследования* в рамках темы «Материя при высоких давлениях» были молибдаты редкоземельных металлов  $R_2(\text{MoO}_4)_3$ , где  $R = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Sm}, \text{Eu}$ , и твердые растворы Cu-H, синтезированные при высоком давлении.

*Цель работы* состояла в экспериментальном исследовании фаз высокого давления в молибдатах РЗМ и в системе Cu-H и превращений этих фаз в процессе отжига при атмосферном давлении.

*Результаты работы:*

– Экспериментально обнаружено, что аморфные образцы, образуемые монокристаллами молибдатов РЗМ при давлениях выше 8–10 ГПа, возвращаются в монокристаллическое состояние с исходной ориентацией после отжига при атмосферном давлении. Установлено, что «метками памяти», обеспечивающими этот эффект «памяти стекла», являются нанодомены  $\delta$ -фазы высокого давления, сохраняющиеся в объеме аморфной матрицы и расположенные ориентационно скоррелированно между собой.

– При давлении водорода 5 ГПа и температуре 600 °С синтезирован образец Cu-H, содержащий 2.5 ат.% H, и исследован методом неупругого рассеяния нейтронов. В измеренном спектре обнаружен пик при переданной энергии 100 мэВ с широким плечом в сторону высоких энергий, характерный для фундаментальной зоны оптических колебаний в изучавшихся ранее гидридах переходных металлов с частично заполненной d-зоной.

*Область применения.* Полученные результаты представляют интерес для физики конденсированного состояния и физического материаловедения. В частности, впервые установлены физические причины такого необычного явления, как эффект «памяти стекла».

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Основная часть.....	9
Наиболее важные результаты.....	9
1.34.1 Эффект «памяти стекла» в редкоземельных молибдатах.....	9
1.34.2 Колебательный спектр твердого раствора водорода в меди.....	9
Заключение.....	10
Список использованных источников.....	11

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
РЗМ	Редкоземельные металлы
ЭПС	Эффект «памяти стекла»
РЦКП ИФТТ	Распределенный центр коллективного пользования
РАН	Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук
ФГУП	Федеральное государственное унитарное предприятие
«ВНИИМС»	Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по Программе Президиума РАН ««Материя при высоких давлениях»» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 г.г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

1) *Эффект «памяти стекла» (ЭПС).* Этот эффект был впервые обнаружен в 1990 году в  $\alpha$ - $\text{AlPO}_4$  (берлините) [1] и заключался в том, что монокристалл  $\text{AlPO}_4$  переходил в ренгеноаморфное состояние при повышении давления и возвращался в исходное монокристаллическое состояние с прежней пространственной ориентацией при последующем снижении давления. За статьей [1] последовало большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию ЭПС в берлините и других минералах. Основная цель этих работ состояла в поиске «меток памяти» – структурных элементов исходного монокристалла, сохранявшихся в аморфном состоянии при высоком давлении и направлявшим процесс кристаллизации при снижении давления. Предлагались различные объяснения – например, разупорядочение монокристалла при аморфизации в результате мартенситных переходов [2], или сохранение в аморфном состоянии неких жестких структурных составляющих – таких, как  $\text{PO}_4$  в  $\text{AlPO}_4$ , в которых центральный атом Р сохраняет четверную координацию под давлением [3]. Ни одно из предложенных объяснений, однако, не нашло экспериментального подтверждения.



2) *Колебательный спектр твердого раствора водорода в меди.* До настоящего времени оптические колебания в разбавленных твердых растворах водорода в простых металлах и в переходных металлах с заполненной d-зоной экспериментально не исследовались. Изученные в 2015 году образцы Cu-H – первый пример такого исследования.

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В исследованиях использовались *современные методы* синтеза и исследования фаз высокого давления. Термобарическая обработка образцов производилась в камерах высокого давления типа «Тороид» [5]. При изучении полученных образцов использовались уникальные научные стенды и установки РЦКП ИФТТ РАН.

Все основные методики РЦКП ИФТТ РАН, используемые для исследований структуры, фазового и химического состава изучаемых образцов, аттестованы и внесены в Федеральный реестр Методик выполнения измерений в ФГУП «ВНИИМС».

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Наиболее важные результаты

#### *1.34.1 Эффект «памяти стекла» в редкоземельных молибдатах.*

Установлено, что при давлениях выше 8–9 ГПа монокристаллические образцы соединений  $R_2(\text{MoO}_4)_3$  (где  $R = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Sm}, \text{Eu}$ ) переходят в структурно неоднородное состояние. Основная часть образца (~97%) становится рентгеноаморфной, но в ней присутствуют островки кристаллической  $\delta$ -фазы высокого давления. Размеры доменов  $\delta$ -фазы составляют 5–50 нм, и они расположены ориентационно скоррелированно между собой в объеме образца. Впервые показано, что эти домены играют роль "меток памяти", благодаря которым при кристаллизации аморфной матрицы после снижения давления происходит возврат образца в монокристаллическое состояние с исходной пространственной ориентацией, называемый эффектом «памяти стекла».

#### *1.34.2 Колебательный спектр твердого раствора водорода в меди.*

Показано, что растворимость водорода в меди при давлениях 5–8 ГПа и температурах 500–800 °С достигает нескольких атомных процентов. В спектре неупругого рассеяния нейтронов у образца Cu-H, полученного закалкой до температуры жидкого азота, обнаружен пик при переданной энергии 100 мэВ с широким плечом в сторону высоких энергий, характерный для фундаментальной зоны оптических колебаний в изучавшихся ранее гидридах переходных металлов с частично заполненной d-зоной. Нагрев закаленных образцов до комнатной температуры приводил к практически полному выделению водорода из меди, но почти весь этот водород сохранялся внутри образца, создав в нем сферические поры диаметром порядка 1 мкм и заполнив их под давлением в несколько тысяч атмосфер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Экспериментально установлено, что «метками памяти», обеспечивающими этот эффект «памяти стекла» в молибдатах РЗМ, являются нанодомены  $\delta$ -фазы высокого давления, сохраняющимися в объеме аморфной матрицы и расположенные ориентационно скоррелированно между собой. В колебательном спектре твердого раствора водорода в меди – металле с полностью заполненной d-зоной – обнаружен пик вблизи 100 мэВ с широким плечом в сторону высоких энергий, характерный для фундаментальной зоны оптических колебаний в изучавшихся ранее гидридах переходных металлов с частично заполненной d-зоной.

Задачи, поставленные в госзадании ИФТТ РАН, полностью решены. Полученные результаты находятся на мировом уровне благодаря синтезированным в ИФТТ РАН высококачественным, однородным образцам с минимальным количеством дефектов и благодаря использованию для их аттестации и исследования современной аппаратуры РЦКП ИФТТ РАН.

Основные результаты проведенного исследования опубликованы в статье:

1. Willinger E., V. Sinitsyn, S. Khasanov, B. Redkin, S. Shmurak, E. Ponyatovsky "Origin of "memory glass" effect in pressure-amorphized rare-earth molybdate single crystals" Journal of Solid State Chemistry v. 222 (2015) p.1–6.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 M.B. Kruger, R. Jeanloz, Science v. 249 (1990) p. 647.
- 2 S. Bustingorry, E.A. Jagla, Phys. Rev. B v. 71 (2005) 224119.
- 3 J.S. Tse, D.D. Klug, Science v. 255 (1992) 1559.
- 4 J.S. Tse, D.D. Klug, J.A. Ripmeester et al., Nature v. 369 (1994) p. 724.
- 5 L.G. Khvostantsev, V.N. Slesarev, V.V. Brazhkin, High Pressure Res. v.24 (2004) p. 371.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)

УДК 532-5, 534-143

ГР № 11512181057

Инв. № 11214-36/2115-95

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

» 2016 г.



О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Нелинейная динамика в математических и физических науках»  
(промежуточный)

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук

В.Б. Ефимов

г. Черноголовка  
2016

# ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ

Ответственный исполнитель

В.Н.С., д.ф.-м.н.



В.Б.Ефимов (1.37)

Исполнители:

Н.С.



И.А.Ремизов (1.37)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 10 страниц, 1 источник

*Ключевые слова:* ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ, КАПИЛЛЯРНЫЕ ВОЛНЫ, ВОЛНОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ, ПОТОК ЭНЕРГИИ

*Объектом исследования* в рамках темы «Нелинейная динамика в математических и физических науках» являются линейные и нелинейные бегущие волны на поверхности воды.

*Целью работы* является определение условий и причин возникновения трех и четырех волновых взаимодействий, определение энергетического баланса при турбулентных процессах на поверхности воды для квазиодномерного случая.

*Результат работы:* Обработаны результаты экспериментов по распространению квазиодномерных гармонических гравитационных волн на поверхности океанского бассейна. Было показано, что при развитии четырех-волнового взаимодействия гравитационных волн передача энергии в диссипативную область капиллярных волн затрудняется и происходит накопление энергии в гравитационной части волнового спектра.

*Областью применения* проведенных исследований является фундаментальная гидродинамика, теория турбулентных процессов, теория возникновения волн большой амплитуды – “freak waves”, «волн убийц», в конечном счете результаты проводимой работы могут быть использованы для создания руководства безопасного плавания в мировом океане.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
Основная часть.....	8
Важнейшие результаты исследований.....	8
<i>1.37 Четырех-волновое взаимодействие гравитационных волн.....</i>	<i>8</i>
Заключение.....	9
Список источников.....	10



## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
$A$	Амплитуда волны
$\lambda$	Длина волны
$k$	Волновое число
$h$	Глубина бассейна
$f$	Частота волны

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Нелинейная динамика в математических и физических науках» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Проблема формирования волн большой амплитуды – “freak waves” или «волн убийц» это проблема накопления энергии в гравитационной части спектра волн на поверхности воды при турбулентном процессе передачи энергии из частотной области спектра накачки энергии в систему (обычно в области частот меньше 1 Гц) в капиллярную область диссипации энергии за счет вязкости. Теоретически такая задача рассмотрена достаточно детально в работах Колмогорова, Захарова с соавторами. Были проведены расчетные эксперименты, которые показали отклонение распределения вероятности возникновения волн разной амплитуды от статистического в области больших волн при развитии нелинейных процессов. Однако экспериментальных данных на реальных объектах, детально рассматривающих проблему поверхностной турбулентности к настоящему времени явно недостаточно из-за сложности проведения измерений в строго заданных начальных условиях

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

Проведенная работа представляет из себя часть обработки большого объема экспериментальной информации, полученной во время измерительного эксперимента в океанском бассейне в Трондхайме (Норвегия), проведенного совместно с учеными Ланкастерского Университета (Англия). Для выполнения работы сотрудники ИФТТ обеспечены компьютерами, обучены пользоваться программами и писать необходимое математические обработки.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *1.37 Четырех-волновое взаимодействие гравитационных волн*

Нами были проведены эксперименты на поверхности воды в океанском бассейне в г.Трондхейм, Норвегия. В данной серии экспериментов изучалось распространение квазиодномерных практически синусоидальных бегущих волн. Амплитуда второй гармоники в данных волнах была на порядок меньше основной гармоники, более высокие кратные гармоники были еще на порядок меньше.

При распространении квазиодномерных бегущих гравитационных волн малой высоты ( $A/\lambda \ll 1$ ) по поверхности глубокой воды ( $k \cdot h > 1$ ) экспериментально было обнаружено, что при развитии четырех-волнового взаимодействия с отраженными волнами слабой интенсивности происходит накопление энергии в гравитационной части спектра при ее перекачке в высокочастотную часть спектра. Объяснением подобного эффекта может быть «bottle-neck» - «узкое горло» для потока энергии в области перехода от гравитационных волн к гравитационным  $f \sim 10$  Hz, где скорость волн минимальна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Ниже приведены краткие выводы по результатам выполнения НИР. В 2015 году проведена обработка экспериментальных данных распространения гармонических волн в квази-одномерном случае, полученных в ходе измерений в океанском бассейне. С помощью статистического анализа данных датчиков, расположенных в разных частях бассейна, удалось определить условия доминирования четырех-волнового взаимодействия. Фурье анализ амплитуд бегущих вдоль бассейна гармонических волн показал возможность накопления энергии в гравитационной части волнового спектра. Начата работа по проведению анализа энергетических спектров с целью определения условий передачи энергии при волновой турбулентности в гравитационной и капиллярной частях спектра для случая пересекающихся гармонических волн.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Efimov V.B., L.P. Mezhov-Deglin, C. D. Dewhurst, A.V. Lokhov, and V.V. Nesvizhevsky, «Neutron scattering on impurity nanoclusters in gel samples» журнал: Advances in High Energy Physics, vol. 2015, ID 808212

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.91

ГР № 115121810055

Инв. № *11214-36/2115-92*

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

*В.В. Кведер*



« *20.07* » 2016 г.

**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и  
ядерные технологии» (промежуточный)**

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук

В.Е. Антонов

г. Черноголовка  
2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



В.Е.Антонов (Введение,  
IV.2.1, заключение)

### Исполнители:

с.н.с. к.ф.-м.н.



В.К.Федотов (IV.2.1)

с.н.с. к.х.н.



В.И.Кулаков (IV.2.1)

с.н.с. к.ф.-м.н.



И.О.Башкин (IV.2.1)



## РЕФЕРАТ

Отчет: 11 страниц, 4 источника

*Ключевые слова:* ВЫСОКОЕ ДАВЛЕНИЕ, ГИДРИДЫ, СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, НЕЙТРОННАЯ ДИФРАКЦИЯ

*Объектом исследования* в рамках темы «Нейтронные исследования гидридов высокого давления» по Программе РАН «Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии» был дейтерид  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$ , синтезированный в ИФТТ РАН при давлении дейтерия 2.8 ГПа.

*Целью работы* было экспериментальное определение кристаллической структуры дейтерида  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$  и теоретическое исследование ее динамической устойчивости, расчет колебательного спектра и температурной зависимости теплоемкости.

*Результаты работы:* Экспериментально установлено, что кристаллическая структура дейтерида  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$  является орторомбической и принадлежит к пространственной группе  $\text{Cmca}$  с параметрами элементарной ячейки  $a = 4.5902(1)$ ;  $b = 8.7943(2)$  и  $c = 4.6861(1)$  Å. Проведенный DFT расчет подтвердил термодинамическую и механическую устойчивость этой структуры.

*Область применения.* Синтез однофазного образца гидрида интерметаллического соединения  $\text{MgNi}_2$ , определение его кристаллической структуры и состава по водороду представляют интерес для разработки дешевых анодных материалов для гидридных батарей.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Основная часть.....	8
Наиболее важные результаты.....	8
<i>IV.2.1 Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии.....</i>	<i>8</i>
Заключение.....	10
Список использованных источников.....	11

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
ОИЯИ	Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований
DFT	Теория функционала плотности
VASP	Пакет компьютерных программ Vienna Ab initio Simulation Package

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по Программе ОФН РАН «Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 г.г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

В 2013 появились сообщения о том, что сплав  $\text{La}_2\text{MgNi}_9$  является исключительно хорошим анодным материалом для гидридных батарей, обладающим разрядной емкостью до 400 мА·ч/г [1,2]. Сплав насыщается водородом до состава  $\text{LaMg}_2\text{Ni}_9\text{H}_{9.5}$ , а его металлическая подрешетка построена из блоков со стехиометрией  $\text{LaNi}_5$  и  $\text{MgNi}_2$ . Кристаллическая структура гидридов соединения  $\text{LaNi}_5$  была ранее изучена в большом числе экспериментальных и теоретических работ. Гидриды соединения  $\text{MgNi}_2$  были синтезированы несколько лет назад при давлениях водорода 2–7 ГПа и температурах 700–800 °С [3,4]. Химический состав гидридов был близок к  $\text{MgNi}_2\text{H}_3$ , а металлическая подрешетка, согласно данным рентген-дифракционного исследования, могла быть либо тетрагональной, либо орторомбической.

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В исследованиях использовались современные методы синтеза и исследования гидридов высокого давления. ИФТТ РАН – единственная организация в мире, располагающая аппаратурой и методиками для синтеза гидридов при давлениях водорода и дейтерия выше 1 ГПа (10000 атм.) в количествах, достаточных для нейтронных исследований. Для определения

полной кристаллической структуры синтезированного дейтерида  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$  было проведено комбинированное исследование с помощью рентгеновской и нейтронной дифракции высокого разрешения. Первопринципные расчеты динамики решетки фазы  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$  с экспериментально определенной кристаллической структурой были выполнены в рамках теории функционала плотности (DFT) с использованием пакета программ VASP.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Наиболее важные результаты

#### *IV.2.1 Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии*

В рамках данного проекта в 2014 году мы синтезировали дейтерид  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$  при давлении дейтерия 2.8 ГПа и температуре 300 °С и изучили его полную кристаллическую структуру (включая расположение атомов дейтерия) методом нейтронной дифракции на дифрактометре DN-2 в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (г. Дубна). Наилучшее описание полученной дифракционной картины методом полнопрофильного анализа было получено в рамках орторомбической структуры с пространственной группой Fmmm. Выполненный нами первопринципный расчет электронной структуры, однако, показал, что такая структура является динамически неустойчивой, поэтому в 2015 году были проведены дополнительные исследования.

В ИФТТ РАН при тех же условиях (давление дейтерия 2.8 ГПа и температура 300 °С) в серии из 5 экспериментов было вновь синтезировано около 1 грамма дейтерида  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$ , но на этот раз мы провели его структурное исследование на установках со значительно большей светосилой и лучшим разрешением. А именно, структура металлической подрешетки образца была исследована методом рентгеновской дифракции с использованием синхротронного излучения, а полная кристаллическая структура – методом нейтронной дифракции высокого разрешения.

В результате этого комбинированного исследования установлено, что орторомбическая структура дейтерида  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$  принадлежит к пространственной группе Cmc21 с более низкой симметрией, чем Fmmm, что ранее нельзя было выявить из-за недостаточного разрешения использовавшегося нейтронового дифрактометра. Проведенный первопринципный DFT расчет подтвердил термодинамическую и

механическую устойчивость этой структуры и дал значения параметров элементарной ячейки ( $a = 4.5356$ ;  $b = 8.8407$ ;  $c = 4.6938 \text{ \AA}$ ;  $V = 188.21 \text{ \AA}^3$ ), близкие к экспериментальным ( $a = 4.5902$ ;  $b = 8.7943$ ;  $c = 4.6861 \text{ \AA}$ ;  $V = 189.17 \text{ \AA}^3$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Экспериментально установлено, что кристаллическая структура дейтерида  $\text{MgNi}_2\text{D}_3$  является орторомбической и принадлежит к пространственной группе  $Cmca$  с параметрами элементарной ячейки  $a = 4.5902(1)$ ;  $b = 8.7943(2)$  и  $c = 4.6861(1)$  Å. Проведенный DFT расчет подтвердил термодинамическую и механическую устойчивость этой структуры.

Задачи, поставленные в госзадании ИФТТ РАН, полностью решены. Полученные результаты находятся на мировом уровне благодаря синтезированному в ИФТТ РАН высококачественному, однородному образцу с минимальным количеством дефектов (методика синтеза не имеет аналогов в мире) и благодаря использованию для его структурного исследования самой современной аппаратуры в крупных международных центрах.

Полученные фундаментальные результаты найдут своё применение в дальнейшем поиске и разработке эффективных и дешевых анодных материалов для гидридных батарей на базе недавно открытых многокомпонентных сплавов, кристаллические структуры которых включают блоки со стехиометрией  $\text{MgNi}_2$ .

Основные результаты проведенного исследования опубликованы в статье:

1. Yartys V.A., V.E. Antonov, D. Chernyshov, J.-C. Crivello, R.V. Denys, V.K. Fedotov, M. Gupta, V.I. Kulakov, M. Latroche, D. Sheptyakov “Structure and chemical bonding in  $\text{MgNi}_2\text{H}_3$  from combined high resolution synchrotron and neutron diffraction studies and ab initio electronic structure calculations” *Acta Materialia* v.98, 2015, p. 416–422.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 C.C. Nwakwuo, Th. Holm, R.V. Denys, Weikang Hu, J.P. Maehlen, J.K. Solberg, et al., J. Alloys Compd. v. 555 (2013) p. 20.
- 2 Wei-Kang Hu, R.V. Denys, C. Nwakwuo, Th. Holm, J.P. Maehlen, J.K. Solberg, et al., Electrochim. Acta v. 96 (2013) p. 27.
- 3 R. Kataoka, Y. Goto, A. Kamegawa, H. Takamura, M. Okada, Mater. Trans. v. 47, No. 8 (2006) p. 1957.
- 4 R. Kataoka, A. Kamegawa, H. Takamura, M. Okada, Mater. Trans. v. 50, No. 5 (2009) p. 1179.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.915, 538.935

ГР № 115121810052

Инв. № *11214-36/2115-98*

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор ИФТТ РАН**

**член-корр. РАН**

**В.В. Кведер**

**2016 г.**



**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Электронный корреляции в системах с сильным взаимодействием»  
(промежуточный)**

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук

**А.А. Шашкин**

**г. Черноголовка  
2016**

## ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ

Научный руководитель  
Зав. лаб., д.ф.-м.н.



А.А. Шашкин (Введение, IV.2.2.1,  
IV.2.2.2, заключение)

Гл.н.с., д.ф.-м.н.



В.Т. Долгополов (IV.2.2.1)

В.н.с., д.ф.-м.н.



Э.В. Девятов (IV.2.2.1, IV.2.2.2)

В.н.с., д.ф.-м.н.



Л.В. Кулик, (IV.2.2.2)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



В.С. Храпай (IV.2.2.2)

С.н.с., к.ф.-м.н.



А.А. Жуков (IV.2.2.2)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 9 страниц, 1 источник

*Ключевые слова:* ДВУМАРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ЭЛЕКТРОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ, ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ.

*Объектом исследования* являются двумерные электронные системы на основе кремниевых МОП структур и квантовые ямы HgTe с инверсией зон.

*Целью работы* является исследование электронных и спиновых корреляций в двумерных электронных системах на основе кремниевых МОП структур и в квантовых ямах HgTe с инверсией зон с использованием ферромагнитных контактов.

*Результаты работы:*

- выполнен анализ данных, касающихся зависимости эффективной массы от электронной плотности в Si-(100) МОП структурах. На основании простейшей модели и данных для массы сделаны экспериментально проверяемые предсказания;
- Показано, что транспорт вдоль края двумерного топологического изолятора в квантовой яме HgTe с инверсией зон чувствителен к взаимной ориентации намагниченностей контактов. Это является прямым экспериментальным доказательством сохранения спина в режиме топологического изолятора, что подтверждает геликоидальную структуру возникающего в нулевом магнитном поле краевого состояния.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
Основная часть.....	7
<i>IV.2.2.1 Эффекты электронных корреляций в двумерных электронных системах в кремниевых МОП структурах.....</i>	<i>7</i>
<i>IV.2.2.2 Структура краевого состояния в квантовых ямах HgTe с инверсией зон.....</i>	<i>7</i>
Заключение.....	8
Список использованных источников.....	9

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
МОП	Металл-Оксид-Полупроводник

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Электронный корреляции в системах с сильным взаимодействием» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Исследование электронных и спиновых корреляций в системах с сильным электрон-электронным взаимодействием и сильным спин-орбитальным взаимодействием вызывает в последнее время большой интерес у научного сообщества. В наших экспериментах использованы двумерные электронные системы в кремниевых МОП структурах с сильным взаимодействием и в квантовых ямах HgTe с инверсией зон.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *IV.2.2.1 Эффекты электронных корреляций в двумерных электронных системах в кремниевых МОП структурах*

Выполнен анализ данных, касающихся зависимости эффективной массы от электронной плотности в Si-(100) МОП структурах, полученных в экспериментах различных групп, и продемонстрировано совпадение этих результатов. На основании простейшей модели и данных для массы сделаны экспериментально проверяемые предсказания и выполнены измерения термодинамической плотности состояний, которые подтверждают справедливость модели.

#### *IV.2.2.2 Структура краевого состояния в квантовых ямах HgTe с инверсией зон*

Проведены исследования транспорта между двумя ферромагнитными (предварительно намагниченными пермаллоевыми) контактами, разнесенными на макроскопическое расстояние 200 мкм вдоль края двумерной системы в режиме спинового квантового эффекта Холла, т.е., вдоль края двумерного топологического изолятора. Такая двумерная система реализована в 8-нм квантовой яме HgTe с инверсией зон. Показано, что транспорт в такой геометрии чувствителен к взаимной ориентации намагниченностей контактов. Это является прямым экспериментальным доказательством сохранения спина при транспорте вдоль края системы в режиме топологического изолятора, что подтверждает геликоидальную структуру возникающего в нулевом магнитном поле краевого состояния.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все пункты плана НИР ИФТТ РАН выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Проведенные исследования обнаружили новые эффекты в поведении электронных систем с сильным взаимодействием. Работы целесообразно продолжить.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Kulik L.V., A.V. Gorbunov, A.S. Zhuravlev, V.B. Timofeev, S. Dickmann, I.V. Kukushkin журнал: «Super-long life time for 2D cyclotron spin-flip excitons» – Scientific Reports v.5, 2015, p.10354

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)

УДК 538.958

ГР № 115121810054

Инв. № 11214-36/2115-101

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

« 20 » 2016 г.



О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Спиновые явления в твердотельных наноструктурах и спинтроника»  
(промежуточный)

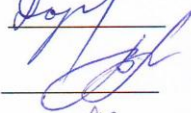
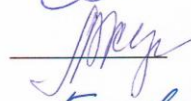


Научный руководитель  
член-корр. РАН

И.В. Кукушкин

г. Черноголовка  
2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Гл. н.с., член-корр. РАН IV.2.3.2, д.ф.-м.н.		И.В. Кукушкин (Введение, заключение)
Зав. лаб., д.ф.-м.н.		С.И. Дорожкин (Введение, IV.2.3.1)
Зав. лаб., д.ф.-м.н.		В.В. Рязанов (IV.2.3.3)
В.н.с., д.ф.-м.н.		Л.В. Кулик (IV.2.3.2)
С.н.с., к.ф.-м.н.		В.В. Больгинов (IV.2.3.3)
Н.с., к.ф.-м.н.		А.А. Капустин (IV.2.3.1)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 14 страниц, 1 источник

*Ключевые слова:*

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ, КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ, МЕТАМАТЕРИАЛЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

*Объектом исследования* являются топологический изолятор  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ , гетероструктуры  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ , структуры из нормальных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнетиков, структуры сверхпроводник/полупроводник/сверхпроводник.

*Целями работы являются:*

- Исследовать осцилляции магнетосопротивления и эффект Холла, нелинейный по магнитному полю в топологическом изоляторе  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ .
- Разработать экспериментальный метод, позволяющий изменять и измерять спиновую конфигурацию в системе двумерных магнитоэкситонов.
- Провести теоретические и экспериментальные исследования спинового и зарядового разбаланса в сверхпроводящих наноструктурах при квазичастичной инжекции в широком интервале температур.
- Разработать и исследовать гибридные двухслойные структуры из нормальных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнетиков.

- Исследовать ток-фазовые соотношения в джозефсоновских структурах сверхпроводник / полупроводниковая тонкая пленка с сильным спин-орбитальным взаимодействием / сверхпроводник в рамках теории сильной связи.

- Изучить влияние спинового намагничивания, индуцированного в двумерном электронном слое электромагнитным полем, на отражение и прохождение этого поля.

*Результаты работы:*

- Исследованы осцилляции магнетосопротивления и эффект Холла, нелинейный по магнитному полю в топологическом изоляторе  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ .

- Разработан экспериментальный метод, позволяющий изменять и измерять спиновую конфигурацию в системе двумерных магнитоэкситонов.

- Проведены теоретические и экспериментальные исследования спинового и зарядового разбаланса в сверхпроводящих наноструктурах при квазичастичной инжекции в широком интервале температур.

- Разработаны и исследованы гибридные двухслойные структуры из нормальных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнетиков.

- Исследованы ток-фазовые соотношения в джозефсоновских структурах сверхпроводник / полупроводниковая тонкая пленка с сильным спин-орбитальным взаимодействием / сверхпроводник в рамках теории сильной связи.

- Изучено влияние спинового намагничивания, индуцированного в двумерном электронном слое электромагнитным полем, на отражение и прохождение этого поля.

#### *Область применения*

В ходе выполнения НИР в 2015 году получены результаты перспективные для разработки нового класса наноструктур, необходимых для создания новых телекоммуникационных приборов

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
Основная часть .....	9
<i>IV.2.3.1 Исследование осцилляций магнетосопротивления и эффект Холла, нелинейный по магнитному полю в топологическом изоляторе <math>Bi_2Te_2Se</math>.....</i>	<i>9.</i>
<i>IV.2.3.2 Разработка экспериментального метода, позволяющего изменять и измерять спиновую конфигурацию в системе двумерных магнитоэкситонов.....</i>	<i>9</i>
<i>IV.2.3.3 Теоретические и экспериментальные исследования спинового и зарядового разбаланса в сверхпроводящих наноструктурах при квазичастичной инжекции в широком интервале температур.....</i>	<i>10</i>
<i>IV.2.3.4 Разработка и исследование гибридных двухслойных структур из нормальных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнетиков.....</i>	<i>10</i>
<i>IV.2.3.5 Исследование ток-фазовые соотношений в джозефсоновских структурах сверхпроводник / полупроводниковая тонкая пленка с сильным спин-орбитальным взаимодействием / сверхпроводник в рамках теории сильной связи.....</i>	<i>11</i>
<i>IV.2.3.6 Изучение влияния спинового намагничивания, индуцированного в двумерном электронном слое электромагнитным полем, на отражение и прохождение этого поля.....</i>	<i>11</i>
Заключение .....	12
Список использованных источников.....	13



## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме № IV.2.3. «Спиновые явления в твердотельных наноструктурах и спинтроника» (0032-2015-0011) является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р. В текущем году на широкой группе образцов проведено исследование ранее обнаруженных квантовых осцилляций в топологических изоляторах и в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик. Продолжены также исследования кинетики спиновой релаксации в системе двумерных электронов в режиме квантового эффекта Холла.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

В традиционных приборах (компьютерах, усилителях, модуляторах), которые используются в настоящее время, в основном используются свойства заряженных возбуждений, что приводит к значительному энергопотреблению и тепловыделению. Несомненно, что с целью экономии ресурсов необходимо разрабатывать альтернативные приборы, в которых использовались бы не зарядовые, а спиновые возбуждения, в которых потери энергии значительно (на порядки) меньше. В этой связи исследование спиновых свойств разнообразных материалов и электронных систем и разработка, например, таких приборов как спиновый транзистор имеет исключительно важное значение. В рамках проекта исследованы осцилляции магнетосопротивления и эффект Холла в топологических изоляторах. Показано наличие слоя поверхностных электронов с энергетическим

спектром, квантуемым в магнитном поле. Разработан экспериментальный метод, позволяющий изменять и определять спиновую конфигурацию в системе двумерных магнитоэкситонов.

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

Научный коллектив исполнителей НИР оснащен современными высокоточными измерительными приборами и комплексами (криостатами с магнитным полем, микроволновые генераторы и резонансные усилители), а также технологическим оборудованием (электронными и оптическими литографами), позволяющим изготавливать и проводить аттестацию новых функциональных материалов, создавать на их основе модельные образцы и производить их исследования во всем спектре условий, необходимых для дальнейшего практического применения.

Научный коллектив исполнителей при выполнении НИР будет использовать уникальные научные стенды и установки Распределенного центра коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук (РЦКП ИФТТ РАН).

Все основные методики РЦКП ИФТТ РАН, используемые для исследований структуры, фазового и химического состава, а также характеристики создаваемых структур, аттестованы и внесены в Федеральный реестр Методик выполнения измерений в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ФГУП «ВНИИМС»).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Процесс теоретических и экспериментальных исследований

*IV.2.3.1. Исследование осцилляций магнетосопротивления и эффект Холла, нелинейный по магнитному полю в топологическом изоляторе  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ .*

На серии образцов материала  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ , относящегося к топологическим изоляторам, исследованы осцилляции магнетосопротивления и эффект Холла, нелинейный по магнитному полю. На основании таких измерений удалось выделить вклад в проводимость слоя поверхностных электронов и показать, что наблюдаемые осцилляции представляют собой осцилляции Шубникова – де Гааза от электронов этого слоя. Сравнение магнетотранспортных данных с результатами сканирующей туннельной спектроскопии указывает на существование загиба зон около поверхности образцов и существование слоя обеднения, разделяющего поверхностную и объемную электронные системы.

*IV.2.3.2. Разработка экспериментального метода, позволяющего изменять и измерять спиновую конфигурацию в системе двумерных магнитоэкситонов.*

Развит экспериментальный метод, позволяющий изменять и определять спиновую конфигурацию в системе двумерных магнитоэкситонов. Исследована кинетика спиновой релаксации в системе двумерных электронов в режиме квантового эффекта Холла. Показано, что в системах  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  с большой подвижностью электронов время релаксации спинового магнитоэкситона может достигать нескольких сотен микросекунд.

Представлено теоретическое объяснение медленной спиновой релаксации спинового магнитоэкситона, которое позволяет объяснить основные экспериментальные зависимости времени релаксации спинового магнитоэкситона от температуры, магнитного поля и ширины квантовой ямы.

*IV.2.3.3. Теоретические и экспериментальные исследования спинового и зарядового разбаланса в сверхпроводящих наноструктурах при квазичастичной инжекции в широком интервале температур.*

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования спинового и зарядового разбаланса в сверхпроводящих наноструктурах при квазичастичной инжекции в широком интервале температур. Показано, что в низкотемпературной области длина зарядового разбаланса существенно зависит от напряжения, при котором происходит инжектирование квазичастиц через границу сверхпроводника и нормального металла (ферромагнетика). Теоретически исследован механизм создания спинового разбаланса в сверхпроводниках и его переноса на мезоскопические расстояния при расщеплении спиновых подзон внешним магнитным полем.

*IV.2.3.4. Разработка и исследование гибридных двухслойных структур из нормальных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнетиков.*

Для изучения влияния spin-orbit torque эффекта и эффектов перемагничивания импульсами тока приготовлены и исследованы гибридные двухслойные структуры из нормальных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнетиков.

*IV.2.3.5. Исследование ток-фазовые соотношений в джозефсоновских структурах сверхпроводник / полупроводниковая тонкая пленка с сильным спин-орбитальным взаимодействием / сверхпроводник в рамках теории сильной связи.*

Теоретически изучено влияние спинового намагничивания, индуцированного в двумерном электронном слое электромагнитным полем, на отражение и прохождение этого поля. Учтены скачки электрического и магнитного поля, возникающие на границе двумерного слоя.

*IV.2.3.6. Изучение влияния спинового намагничивания, индуцированного в двумерном электронном слое электромагнитным полем, на отражение и прохождение этого поля.*

Теоретически исследованы ток-фазовые соотношения в джозефсоновских структурах сверхпроводник / полупроводниковая тонкая пленка с сильным спин-орбитальным взаимодействием / сверхпроводник в рамках теории сильной связи. Изучены особенности в ток-фазовых соотношениях в сильном магнитном поле, связанные с майорановскими модами нулевой энергии в структурах. Изготавливаются наноструктуры на основе InAs эпитаксиальных пленок и сверхпроводящих ниобиевых электродов для экспериментального изучения ток-фазовых соотношений и проверки эффектов, предсказанных теоретически.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все пункты плана НИР ИФТТ РАН по теме № IV.2.3. «Спиновые явления в твердотельных наноструктурах и спинтроника» (0032-2015-0011) на 2015 год выполнены полностью. В текущем году на широкой группе образцов проведено исследование ранее обнаруженных квантовых осцилляций в топологических изоляторах и в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик. Продолжены также исследования кинетики спиновой релаксации в системе двумерных электронов в режиме квантового эффекта Холла.

В 2015 году получены следующие результаты:

1. Исследованы осцилляции магнетосопротивления и эффект Холла, нелинейный по магнитному полю в топологическом изоляторе  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ .
2. Разработан экспериментальный метод, позволяющий изменять и измерять спиновую конфигурацию в системе двумерных магнитоэкситонов.
3. Проведены теоретические и экспериментальные исследования спинового и зарядового разбаланса в сверхпроводящих наноструктурах при квазичастичной инжекции в широком интервале температур.
4. Разработаны и исследованы гибридные двухслойные структуры из нормальных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнетиков.
5. Исследованы ток-фазовые соотношения в джозефсоновских структурах сверхпроводник / полупроводниковая тонкая пленка с сильным спин-орбитальным взаимодействием / сверхпроводник в рамках теории сильной связи.
6. Изучено влияние спинового намагничивания, индуцированного в двумерном электронном слое электромагнитным полем, на отражение и прохождение этого поля.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Капустин А.А., В.С. Столяров, С.И. Божко, Д.Н. Борисенко, Н.Н. Колесников «Поверхностная природа квазидвумерных осцилляций Шубникова-де Гааза в  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ », ЖЭТФ, т. 148, 2015, стр. 321

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 548.5. 54.055, 537.622;544.015.4;548.5

ГР № 115121810059

Инв. № *112-14-36 / 215-96*

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер



« *20.04* » 2016 г.

**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Физика новых материалов и структур» (промежуточный)**

Научный руководитель

чл.-корр. РАН *В.В. Кведер* В.В. Кведер

г. Черноголовка  
2016



## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., к.т.н.



Н.Н.Колесников (Введение, IV.2.4. 3,  
заклучение)

### Исполнители:

В.н.с., д.ф.-м.н.



И.М.Шмытько (IV.2.4.5)

В.н.с., д.ф.-м.н.



А,М.Ионов (IV.2.4.2, IV.2.4.5)

зав. лаб., д.т.н.



Г.А.Емельченко (IV.2.4.4)

зав. лаб., д.т.н.



В.Н.Курлов (IV.2.4.6)

зав. лаб., д.ф.-м.н.



Б.Б.Страумал (IV.2.4.7)

С.н.с., к.т.н.



Д.Н.Борисенко (IV.2.4.3)

С.н.с., к.т.н.



Е.Б.Борисенко (IV.2.4.3)

С.н.с., к.ф.-м.н.



Н.А.Тулина (IV.2.4.5, IV.2.4.1)

С.н.с., к.ф.-м.н.



С.И.Божко (IV.2.4.2, IV.2.4.5)

С.н.с., к.т.н.



В.М.Масалов (IV.2.4.4)

С.н.с., к.т.н.



А.А.Жохов (IV.2.4.4)

н.с., к.ф.-м.н.



А.А.Капустин (IV.2.4.2)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 17 страниц, 1 источник.

*Ключевые слова:* 2D СТРУКТУРЫ, НАНОВИСКЕРЫ, БИПОЛЯРНЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕЗИСТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ, СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЙ, ФОТОХРОМНЫЙ, ФЕРРОМАГНИТНЫЙ, ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ИЗОЛЯТОР, ПРОФИЛИРОВАННЫЕ ОКСИДНЫЕ ЭВТЕКТИКИ

*Объектом исследования* являются нановискеры, топологические изоляторы, полупроводники группы GaSe и GaTe, оксидные эвтектики, наноструктурные пленки ZnO.

*Целями работы* являются исследование и разработка новых материалов, установление закономерностей формирования разных структур, создание новых материалов с требуемым комплексом физико-химических свойств.

### *Результаты работы*

- Разработаны лабораторные и технологические методики получения ряда новых материалов и структур. В части материалов для спинтроники создана методика выращивания нановискеров  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  длиной 2,5 мкм и диаметром 100-150 нм.
- Проведены магнитотранспортные измерения при температурах жидкого гелия для  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  в диапазоне толщин от 30 до 200 мкм. На всех образцах наблюдались осцилляции Шубникова-де Гааза (ШдГ) и сублинейная зависимость холловского сопротивления от магнитного поля.
- Проведены исследования биполярных эффектов резистивных переключений (БЭРП) в мезоскопических структурах на основе аморфных и кристаллических пленок оксида ниобия и селенида висмута. Показано, что БЭРП проявляются значительно сильнее в структурах на основе многофазных нанокристаллических пленок оксида ниобия.

- Предложены методики получения монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_x\text{Te}_{3-x}$  и показана возможность приготовления из них фольг, ориентированных в плоскости (0001) и для изучения поверхностных состояний.

- В части материалов для источников излучения видимого, ИК и ТГц диапазонов исследованы люминесцентные свойства и оптическая стабильность 2D структур на основе GaSe и GaTe, имеющих толщину в одну элементарную ячейку, перспективных для создания новых светоизлучающих приборов видимого диапазона. Также разработаны фотохромные люминесцентные стекла, изменяющие цвет при воздействии УФ излучения и обладающие полной и практически мгновенной обратимостью окраски.

- При исследовании магнитных материалов показано, что наноструктурные пленки ZnO с различным содержанием Ni, синтезированные методом жидкостной керамики, при концентрации  $\text{Ni} < 10\%$  (ат.) содержали только твердый раствор на основе ZnO со структурой вюрцита и демонстрировали ферромагнитное поведение.

- Получены профилированные оксидные эвтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_3(\text{Er}_3)\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-GdAlO}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ , которые обладают высоким сопротивлением ползучести, износостойкостью, коррозионной стойкостью, высокой химической инертностью, прочностью и термоокислительной стойкостью при температурах 1400-1600°C.

*Область применения:* спинтроника, Полученные результаты важны при разработке элементов спинтроники, они могут быть использованы для создания новых приборов нанoeлектроники, для детектирования ультрафиолетового излучения. Полученные результаты перспективны для использования в элементах газотурбинных двигателей для увеличения эксплуатационных температур, ведущих к существенному повышению эффективности многих конструкций. Разработки на базе полученных

результатов могут быть использованы для создания автономных источников электроснабжения отдаленных поселков, фермерских хозяйств и др.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	8
Основная часть.....	10
<i>IV.2.4.1 Разработка методики выращивания нановискеров <math>Bi_{1-x}Sb_x</math>.</i> ....	10
<i>IV.2.4.2 Исследование поверхностных состояний.....</i>	10
<i>IV.2.4.3 Новые материалы для источников излучения видимого, ИК и ТГц диапазонов.....</i>	11
<i>IV.2.4.4 Выращивание крупных кристаллов <math>\alpha</math>-<math>NiSO_4 \cdot 6H_2O</math>.....</i>	11
<i>IV.2.4.5 Исследования биполярных эффектов резистивных переключений в мезоскопических структурах.....</i>	12
<i>IV.2.4.6. Получение профилированных оксидных эвтектик.....</i>	12
<i>IV.2.4.7 Получение наноструктурных пленок <math>ZnO</math> с различным содержанием <math>Ni</math> .....</i>	13
Заключение.....	15
Список источников.....	17

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

БЭРП	биполярные эффекты резистивных переключений
ИК	Инфракрасный
НИР	Научно-исследовательская работа
СТМ	Сканирующая туннельная микроскопия
ТГц	Терагерцовый
УФ	Ультрафиолетовый
ШдГ	[осцилляции] Шубникова-де Гааза
2D	Двумерный

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Физика новых материалов и структур» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемое в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Поиск новых материалов и структур, обладающих специфическими характеристиками – это основное направление как в современном материаловедении, так и в области исследования физических свойств материалов. Наибольший интерес в плане фундаментальных научных исследований вызывают низкоразмерные структуры, открывающие новые применения в спинтронике, нанооптоэлектронике, наноптике и в целом ряде других применений, обеспечивающих миниатюризацию техники при одновременном снижении энергозатрат на ее эксплуатацию. В части создания объемных материалов весьма важным является разработка оптических и конструкционных материалов, обладающих сочетанием характеристик, превосходящих аналогичные параметры известных веществ при одновременном наличии новых свойств.

Работы 2015 г. основаны на достигнутом в ИФТТ РАН научно-техническом заделе, высокой квалификации исследователей, полученных патентах на изобретения и полезные модели, на существующем уникальном оборудовании, частично разработанном и изготовленном в стенах института. Большинство созданных в ходе работы результатов являются принципиально новыми. Исследования в рамках данной тематики тесно связаны с работами по другим темам плана ИФТТ РАН.

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В исследованиях использовали современные методы создания новых материалов и структур, во многом разработанные в ИФТТ РАН. К ним относятся вертикальная зонная плавка под давлением (для выращивания кристаллов халькогенидов металлов), химико-механическая эксфолиация анизотропных халькогенидных материалов, выращивание  $\alpha\text{-NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  в формообразователях, комплексное легирование стекол, получение профилированных оксидных эвтектик. Характеристики изготавливаемых материалов изучали современными методами исследования, такими, как энерго- и волнодисперсионный микрорентгеноспектральный анализ, рентгеноструктурный анализ, оптическая спектроскопия ИК, УФ и видимого диапазонов спектра, высокоразрешающая просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, прецизионное измерение механических свойств.



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты

#### *IV.2.4.1 Разработка методики выращивания нановискеров $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$*

Разработана методика выращивания нановискеров  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Получены нановискеры длиной 2.5 мкм и диаметром 100-150 нм..... Данные объекты представляют значительный интерес для спинтроники т.к., при определенном соотношении Bi и Sb, гальваномагнитные свойства вискеро́в обусловлены проводимостью по поверхностным топологическим состояниям.

#### *IV.2.4.2 Исследование поверхностных состояний*

Для обнаружения поверхностных состояний были проведены магнитотранспортные измерения при температурах жидкого гелия для серии образцов топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  в диапазоне толщин от 30 до 200 мкм. На всех образцах наблюдались осцилляции Шубникова-де Гааза (ШдГ) и сублинейная зависимость холловского сопротивления от магнитного поля. Было обнаружено, что период ШдГ осцилляций по обратному магнитному полю одинаков для всех образцов с точностью до 15%. Положение осцилляций определяется компонентой магнитного поля, перпендикулярной поверхности. Показано, что полученные результаты хорошо описываются в рамках модели проводимости, оперирующей трехмерной и двумерной группами электронов. Установлено, что двумерные электроны характеризуются величиной удельной проводимости, относительно слабо меняющейся от образца к образцу, а также не имеющей систематической зависимости от толщины. Такое поведение может быть связано только с их поверхностной локализацией. Сравнение результатов магнитотранспортных измерений с результатами сканирующей туннельной спектроскопии на атомно гладкой поверхности кристаллов  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  в сверх высоком вакууме показало, что поверхностные носители в результате загиба зон отделены от

объемных слоев обеднения толщиной около 100 нм. Благодаря этому эффекту, вклад поверхностных электронов в проводимость образцов с толщинами менее 200 нм должен быть определяющим.

#### *IV.2.4.3 Новые материалы для источников излучения видимого, ИК и ТГц диапазонов*

Исследованы люминесцентные свойства и оптическая стабильность 2D структур на основе GaSe и GaTe, имеющих толщину в одну элементарную ячейку, перспективных для создания новых светоизлучающих приборов видимого диапазона. Предложены методики получения монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{SexTe}_{3-x}$  и показана возможность приготовления из них фольг, ориентированных в плоскости (0001). Изготовленные тонкие структуры пригодны, в т.ч., для изучения поверхностных состояний.

Исследованы светоизлучающие переходы в ионах Eu, Tb и Tm при комбинированном легировании  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$  оксидами этих элементов. Полученные результаты сделали возможной разработку люминесцентных материалов для конструирования новых экономичных источников света видимого диапазона, на основе более дешевых матриц, в частности, литий-боратного стекла. Важным является получение фотохромных люминесцентных стекол, изменяющих цвет при воздействии УФ излучения и обладающих полной и практически мгновенной обратимостью окраски.

#### *IV.2.4.4 Выращивание крупных кристаллов $\alpha\text{-NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$*

Предложены методика и схема ростовой установки для выращивания монокристаллов в стационарных условиях переохлаждения и принудительной конвекции водного раствора. Определены условия выращивания крупных монокристаллов  $\alpha\text{-NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Исследовано влияние температурных и гидродинамических условий проведения процесса на скорость роста монокристаллов. Методом рентгеновской топографии

показано отсутствие зонарной неоднородности, а в кристалле, выращенном в формообразователе, – и секториальной, поскольку рост осуществлялся только гранью (001).

#### *IV.2.4.5 Исследования биполярных эффектов резистивных переключений в мезоскопических структурах*

Проведены исследования биполярных эффектов резистивных переключений (БЭРП) в мезоскопических структурах на основе аморфных и кристаллических пленок оксида ниобия и селенида висмута. БЭРП проявляются значительно в структурах на основе многофазных нанокристаллических пленок оксида ниобия. На сегодня ни одна из теоретических моделей не может объяснить явление переключений полностью из-за нехватки фундаментального понимания процесса резистивных переключения. Чтобы объяснить действующие принципы точно, необходимо всестороннее понимание механизма переключения сопротивления на атомистическом уровне: как проводящие пути образуются и распадаются. Анализ температурных зависимостей сопротивления метастабильных состояний доказывает, что перколяционные пути формируются не металлическими нитями в мезоскопической структуре Nb/Nb<sub>2</sub>O<sub>5-x</sub>/Ag, а образуются по дефектным границам зерен. Эффекты БЭРП, которые мы наблюдаем в наших образцах, как мы полагаем, связаны с диодным характером токопереноса в структурах с барьерами типа Шоттки на сильно легированных полупроводниках и с существованием вакансий кислорода в интерфейсе структур на основе многофазного и наноструктурированного оксида.

#### *IV.2.4.6 Получение профилированных оксидных эвтектик*

Направленной кристаллизацией из расплава получены профилированные оксидные эвтектики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>3</sub>(Er<sub>3</sub>)Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GdAlO<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), которые обладают высоким сопротивлением ползучести, износостойкостью,

коррозионной стойкостью, высокой химической инертностью, прочностью и термоокислительной стойкостью при температурах 1400-1600°C. Получены оксидные эвтектики в виде волокон, стержней различного сечения, трубок и профилей сложного поперечного сечения. Проведено исследование зависимости размера микроструктуры от скорости кристаллизации. Показано, что модель кристаллизации профилированных эвтектик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_3(\text{Er}_3)\text{Al}_5\text{O}_{12}$  соответствует теории Ханта-Джексона. Прочность на изгиб для эвтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Er}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  составляет более 700 МПа для комнатной температуры и более 400 МПа для температуры 1450°C. Для эвтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-GdAlO}_3$  показано, что при скоростях кристаллизации 80-150 мм/час образуется структура с равномерно распределенными волокнами  $\text{GdAlO}_3$  в матрице  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Диаметр волокон может достигать значений менее 500 нм.

#### *IV.2.4.7 Получение наноструктурных пленок ZnO с различным содержанием Ni*

Наноструктурные пленки ZnO с различным содержанием Ni (между 0 и 40 ат.%) были синтезированы методом жидкостной керамики. Пленки, в которых концентрация Ni не превышала 10 % (ат.) содержали только твердый раствор на основе ZnO со структурой вюрцита. При концентрации Ni выше 10% (ат.) на рентгеновских спектрах появляются пики второй фазы NiO. На основе сравнения опубликованных данных по растворимости оксида никеля (II) в ZnO и результатов, полученных в проведенном нами исследовании, было установлено, что растворимость NiO существенно возрастает с уменьшением размера зерен. Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии показало, что пленка ZnO состоит из равноосных зерен со средним размером около 40 нм. Наноструктурные пленки ZnO, легированные Ni, показали ферромагнитное поведение: для образцов с 5% (ат.) Ni намагниченность насыщения 10-5 едн/см<sup>3</sup>, а коэрцитивная сила составила 0,05 Т. Исследования методом РФЭС показали, что основная аналитическая линия кислорода O1s содержит

по крайней мере два пика, и можно говорить, как минимум, о двух состояниях кислорода на поверхности пленки. Энергия первого достаточно близка табличному значению для кислорода в ZnO (~530 эВ). Второе состояние соответствует энергии ~531.7 эВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2015 г. научно-исследовательская деятельность проводилась в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Получены следующие принципиально новые результаты.

Разработана методика выращивания нановискеров  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Разработана методика переноса и приваривания отдельного нановискера на кончик иглы туннельного микроскопа при помощи сфокусированных ионных пучков. Получено атомное разрешение на поверхности Sb (111) на СТМ изображениях с использованием такого зонда. Данные объекты представляют значительный интерес для спинтроники, т.к. при определенном соотношении Bi и Sb гальваномагнитные свойства вискеро́в обусловлены проводимостью по поверхностным топологическим состояниям.

Сравнение результатов магнитотранспортных измерений с результатами сканирующей туннельной спектроскопии на атомно гладкой поверхности кристаллов  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  в сверхвысоком вакууме показало, что поверхностные носители в результате загиба зон отделены от объемных слоев обеднения толщиной около 100 нм. Благодаря этому эффекту, вклад поверхностных электронов в проводимость образцов с толщинами менее 200 нм должен быть определяющим.

Исследованы люминесцентные свойства и оптическая стабильность 2D структур на основе GaSe и GaTe, имеющих толщину в одну элементарную ячейку, перспективных для создания новых светоизлучающих приборов видимого диапазона.

Получены фотохромные люминесцентные стекла, изменяющие цвет при воздействии УФ излучения и обладающие полной и практически мгновенной обратимостью окраски.

Предложены новые методика и схема ростовой установки для выращивания монокристаллов в стационарных условиях переохлаждения и

принудительной конвекции водного раствора. Определены условия выращивания крупных монокристаллов  $\alpha$ -NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O.

Исследованы биполярные эффекты резистивных переключений в мезоскопических структурах на основе аморфных и кристаллических пленок оксида ниобия и селенида висмута. Показано, что БЭРП проявляются значительно в структурах на основе многофазных нанокристаллических пленок оксида ниобия.

Получены оксидные эвтектики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>3</sub>(Er<sub>3</sub>)Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GdAlO<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в виде волокон, стержней различного сечения, трубок, которые обладают высоким сопротивлением ползучести, износостойкостью, коррозионной стойкостью, высокой химической инертностью, прочностью и термоокислительной стойкостью при температурах 1400-1600°C. Прочность на изгиб для эвтектики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> составляет более 700 МПа для комнатной температуры и более 400 МПа для температуры 1450°C.

Экспериментально продемонстрировано, что наноструктурные пленки ZnO, легированные Ni, ферромагнитны: для образцов с 5% (ат.) Ni намагниченность насыщения составляет 10<sup>-5</sup> ему/см<sup>3</sup>, а коэрцитивная сила 0,05 Т.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Брантов С.К. Терморезистивный композиционный материал на основе карбида кремния. «Материаловедение» (2015), вып..11, с.85-91.



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.935, 538.915, 538.945

ГР № 01201454595

Инв. № *11214-36/2115-84*

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор ИФТТ РАН**

**член-корр. РАН**

**В.В. Кведер**



**2016 г.**

**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Электронные явления и квантовый транспорт в сильно-  
коррелированных металлических, полупроводниковых и гибридных  
системах» (промежуточный)**

**Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук**

**В.В. Рязанов**

**г. Черноголовка  
2016**

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



В.В.Рязанов (Введение, 8.1.1, 8.1.3,  
8.1.10, заключение)

Зав. сектором, д.ф.-м.н.



С.И.Дорожкин (8.1.6, 8.1.8)

в.н.с., д.ф.-м.н

В.Н.Зверев (8.1.7)

### Исполнители:

Зав. лаб. д.ф.-м.н



А.А.Шашкин (8.1.5)

Гл. н.с., д.ф.-м.н



В.Т.Долгополов (8.1.5)

в.н.с., д.ф.-м.н



Л.Я.Винников (8.1.1)

в.н.с., д.ф.-м.н



Э.В.Девятков (8.1.4)

с.н.с., к.ф.-м.н



А.А.Жуков (8.1.5)

с.н.с., к.ф.-м.н



Л.В.Зорина (8.1.7)

зав. лаб. к.ф.-м.н



В.С.Храпай (8.1.9)

с.н.с., к.ф.-м.н



Д.В.Шовкун (8.1.9)

с.н.с., к.ф.-м.н



А.В.Пальниченко (8.1.2)

с.н.с., к.ф.-м.н



Н.А.Тулина (8.1.10)

с.н.с., к.ф.-м.н



А.М.Бобков (8.1.11)

с.н.с., к.ф.-м.н



И.В.Бобкова (8.1.11)

н.с., к.ф.-м.н



С.В.Егоров (8.1.2)

н.с., к.ф.-м.н



А.А.Капустин (8.1.6, 8.1.8)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 16 страниц, 28 источников

*Ключевые слова* СИЛЬНО-КОРРЕЛИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ, ОРГАНИЧЕСКИЕ МЕТАЛЛЫ, ДЖОЗЕФСОНОВСКАЯ МАГНИТНАЯ ПАМЯТЬ, СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КУБИТЫ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И НАНОПРОВОЛОКИ, ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ

*Объектом исследования* в рамках направления 8.1 «Электронные явления и квантовый транспорт в сильно-коррелированных металлических, полупроводниковых и гибридных системах» являются различные материалы с сильными электронными корреляциями: высокотемпературные сверхпроводники, сверхпроводящие гибридные многослойные структуры, органические металлы, полупроводниковые гетероструктуры, топологические изоляторы и др.

*Целью работы* является установление фундаментальных механизмов и закономерностей возникновения новых электронных состояний, механизмов квантового транспорта и когерентности в гибридных и гетероструктурах.

*Результаты работы:*

- исследована вихревая структура в тонких монокристаллах высокотемпературного сверхпроводника  $\text{BSCCO}(2212)$  с решёткой искусственных центров пиннинга;
- обнаружена интерфейсная сверхпроводимость при температуре ниже 37 К в образцах металлооксидной смеси  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , подвергнутых ударно-волновому сжатию до  $\approx 17$  ГПа;
- исследовано неравновесное сверхпроводящее состояние, возникающее при инжекции неравновесных квазичастиц в гибридных джозефсоновских наноструктурах;

- изготовлены и исследованы элементы джозефсоновской магнитной памяти с прямоугольными ферромагнитными барьерами;
- изготовлены и измерены сверхпроводящие кубиты, в том числе сверхпроводящий потоковый кубит с встроенным инвертором сверхпроводящей фаз;
- исследован электронный транспорт в низкоразмерных сильно-коррелированных и гибридных системах с сильным электрон-электронным взаимодействием и сильным спин-орбитальным взаимодействием; продемонстрирована устойчивая геликоидальная структура краевого состояния в образцах с ферромагнитными контактами;
- обнаружено явление, известное как слипание квантовых уровней, в гетероструктурах с двойными квантовыми ямами, связанными межэлектронным взаимодействием;
- обнаружено уменьшение вклада резонансного поглощения в фото-отклик по мере увеличения плотности двумерных электронов в полевых транзисторах на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs; полученные результаты свидетельствуют о существовании одноэлектронного механизма поглощения микроволнового излучения, ответственного за осцилляции магнетосопротивления;
- получены и исследованы кристаллы четырех новых катион-радикальных солей, относящихся к семейству бифункциональных молекулярных проводников на основе молекулы BEDT-TTF;
- различными методами исследованы образцы топологических изоляторов  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ; проведены первые эксперименты по измерению транспорта и дробового шума в контактах топологического изолятора и нормального металла; исследовано влияние барьерных свойств интерфейса на биполярный эффект резистивных переключений (БЭРП) в пленочных гетероструктурах на основе селенида висмута  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ;

- предложен новый механизм создания неравновесных спиновых сигналов и переноса их на мезоскопические расстояния в сверхпроводнике при наличии расщепления спиновых подзон внешним магнитным полем.

#### *Область применения*

Полученные в 2015 году фундаментальные результаты могут быть использованы в новых поколениях электронных систем и устройств. В частности, системы с искусственным пиннингом - при создании сверхпроводящих передающих цепей; элементы джозефсоновской магнитной памяти – в сверхбыстрой цифровой сверхпроводящей электронике; новые явления в полупроводниковых гетероструктурах и топологических изоляторах – в новых поколениях полупроводниковой электроники.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Основная часть.....	7
8.1.1. Вихревая структура в высокотемпературных сверхпроводниках.....	7
8.1.2. Межфазная сверхпроводимость в контактах $Al/Al_2O_3$ .....	7
8.1.3. Джозефсоновская магнитная память и сверхпроводящие кубиты ...	8
8.1.4. Полупроводниковые структуры с сильным электрон-электронным и спин-орбитальным взаимодействием.....	8
8.1.5. Слипание энергетических уровней и другие явления в низкоразмерных полупроводниковых структурах.....	9
8.1.6. Резонансное поглощение микроволнового излучения в структурах с двумерным электронным газом.....	9
8.1.7. Новые молекулярные проводники семейства BEDT-TTF.....	9
8.1.8. Изготовление и туннельная спектроскопия структур на основе топологического изолятора $Bi_2Te_2Se$ и $Bi_2Se_3$ .....	10
8.1.9. Дробовой шум в контактах топологического изолятора и нормального металла.....	10
8.1.10. Биполярный эффект резистивных переключений в пленочных гетероструктурах на основе $Bi_2Se_3$ .....	11
8.1.11. Неравновесный спиновый перенос в сверхпроводниках в условиях расщепления спиновых подзон внешним магнитным полем.....	11
Заключение.....	12
Список источников.....	13

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР                      Научно-исследовательская работа

BEDT-TTF

БЭРП                  Биполярный эффект резистивных переключений

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Жаропрочные материалы для новой техники» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Сильные электронные корреляции в различных твердотельных системах являются источником новых перспективных явлений, обнаруженных в различных материалах в последние десятилетия. Среди них, высокотемпературная сверхпроводимость в слоистых и низкоразмерных структурах, когерентные квантовые явления в джозефсоновских переходах и других гибридных сверхпроводящих системах, новые электронные и спиновые явления в полупроводниковых двумерных электронных слоях и квантовых ямах, кристаллах органических металлов и топологических изоляторов.

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В настоящем направлении исследований ИФТТ РАН объединены различные группы исследователей, использующие разнообразные современные методы для исследования сильно-коррелированных электронных систем.



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *8.1.1 Вихревая структура в высокотемпературных сверхпроводниках*

Методом декорирования исследована вихревая структура в тонких монокристаллах высокотемпературного сверхпроводника BSCCO(2212) с решёткой искусственных центров пиннинга нанометрового масштаба, созданных с помощью фокусированного пучка ионов. Визуализированы картины вихревых структур в зависимости от магнитного поля и периода решётки центров пиннинга.

#### *8.1.2 Межфазная сверхпроводимость в контактах Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*

С помощью измерений динамической магнитной восприимчивости обнаружена сверхпроводимость при температуре  $\approx 37$  К в образцах металлооксидной смеси Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, подвергнутых ударно-волновому сжатию до  $\approx 17$  ГПа. Магнитометрические измерения, проведенные в температурном интервале  $4.2 \text{ К} \leq T \leq 80 \text{ К}$  в различных постоянных и переменных магнитных полях, а также рентгеноструктурные исследования указывают на то, что сверхпроводимость возникает в пограничном слое между фазами металлического алюминия и его оксида Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Обнаружено, что исследованные сверхпроводники являются неустойчивыми при комнатной температуре, в то время как хранение образцов при температуре жидкого азота (77 К) позволяет стабилизировать их сверхпроводящие свойства в метастабильном состоянии.

Отработана технология приготовления субмикронных гибридных структур с использованием электронной литографии и плазмохимического травления. С помощью нормальной и сверхпроводящей нанопроб в субмикронной гибридной структуре детально исследовано неравновесное сверхпроводящее состояние, возникающее при инъекции неравновесных квазичастиц.

*8.1.3 Джозефсоновская магнитная память и сверхпроводящие кубиты*  
Изготовлены и исследованы элементы джозефсоновской магнитной памяти с прямоугольными ферромагнитными барьерами. Получена заметная разность критических токов при перемагничивании джозефсоновской структуры вдоль разных осей прямоугольного ферромагнитного барьера, что обеспечивает реализацию переключений в случае однодоменного ферромагнитного барьера.

Реализован и измерен первый российский сверхпроводящий кубит, а также сверхпроводящий потоковый кубит с встроенным инвертором сверхпроводящей фазы ( $\pi$  – контактом). Показано, что использование  $\pi$  – контакта позволяет достигать рабочего режима кубита без необходимого в обычном случае внешнего магнитного поля. Предполагается, что это обеспечит увеличение времен когерентности кубита и сделает архитектуру многокубитных систем более компактной.

*8.1.4 Полупроводниковые структуры с сильным электрон-электронным и спин-орбитальным взаимодействием*

Исследован электронный транспорт в низкоразмерных сильно-коррелированных и гибридных системах, которые характеризуются сильным электрон-электронным взаимодействием или сильным спин-орбитальным взаимодействием. В частности, исследованы гибридные структуры на базе квантовых ям HgTe с инвертированным спектром. Эксперименты на таких структурах с ферромагнитными контактами, проведенные при сверхнизких температурах, свидетельствуют об устойчивости геликоидальной структуры краевого состояния.

*8.1.5 Слипание энергетических уровней и другие явления в низкоразмерных полупроводниковых структурах*

В серии экспериментов на двойных квантовых ямах показано, что благодаря межэлектронному взаимодействию квантовые уровни с разными изоспиновыми индексами в двойной квантовой яме совпадают с энергией Ферми в широком диапазоне нормальных магнитных полей, т.е. обнаружено явление известное как слипание квантовых уровней.

В экспериментах по исследованию транспорта электронов в массиве нанопроволок InAs под влиянием заряженного острия атомно-силового микроскопа обнаружено обусловленное кулоновским взаимодействием упорядочение в положении узлов модуляции зарядовой плотности.

#### *8.1.6 Резонансное поглощение микроволнового излучения в структурах с двумерным электронным газом*

В образцах полевых транзисторов на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs исследовано влияние резонансного поглощения микроволнового излучения, происходящего за счет возбуждения магнетоплазмона, на форму индуцированных излучением осцилляций магнетосопротивления двумерных электронов. Установлено, что ширина линии поглощения значительно уже области фото-отклика в магнетосопротивлении. Обнаружено уменьшение вклада резонансного поглощения в фото-отклик по мере увеличения плотности двумерных электронов при одновременном возрастании амплитуды осцилляций. Полученные результаты свидетельствуют о существовании одноэлектронного механизма поглощения микроволнового излучения, ответственного за осцилляции магнетосопротивления.

#### *8.1.7 Новые молекулярные проводники семейства BEDT-TTF*

Получены и исследованы кристаллы четырех новых катион-радикальных солей, относящихся к семейству бифункциональных молекулярных проводников на основе BEDT-TTF с парамагнитными трис(оксалато)ферратными анионами,  $\beta''$ -(BEDT-TTF)<sub>4</sub>(NH<sub>4</sub>)[Fe<sup>III</sup>(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]G, где G – гостевая молекула растворителя. Для всех четырех солей по

осцилляциям Шубникова – де Гааза определены величины эффективных циклотронных масс и параметры Ферми-поверхности. Эти данные оказались в хорошем согласии с результатами численных расчетов расширенным методом Хюккеля.

Для изготовления проводящих зондов атомно-силового микроскопа освоена техника электронной литографии для изготовления контактов к одностенным металлическим углеродным нанотрубкам с их предварительным электронно-лучевым отжигом.

#### *8.1.8 Изготовление и туннельная спектроскопия структур на основе топологического изолятора $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_3$*

Изготовлена установка для выращивания наноструктур из сплавов висмута с теллуром, селеном и др. методом переосаждения через газовую фазу. Выращены двумерные и одномерные нанокристаллы  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

Методом сканирующей туннельной спектроскопии исследована поверхность образцов топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ , полученных сколом в условиях сверхвысокого вакуума. На атомно-гладких участках поверхности получены туннельные спектры, демонстрирующие конечную величину плотности состояний в щели объемного  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ . Обнаружено, что плотность состояний линейно зависит от энергии, что согласуется с предсказаниями линейной дисперсии поверхностных состояний в топологических изоляторах.

#### *8.1.9 Дробовой шум в контактах топологического изолятора и нормального металла*

Проведены первые эксперименты по измерению транспорта и дробового шума в контактах топологического изолятора и нормального металла. В нормальном состоянии обнаружен шум, близкий к диффузионному пределу.

#### *8.1.10 Биполярный эффект резистивных переключений в пленочных гетероструктурах на основе $\text{Bi}_2\text{Se}_3$*

Исследовано влияние барьерных свойств интерфейса на биполярный эффект резистивных переключений (БЭРП) в пленочных гетероструктурах на основе селенида висмута  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Показано, что пороговой частотой для наблюдения переключений является величина порядка  $10^4$  Гц. Переключения контролируются двумя процессами: изменением резистивного состояния интерфейса нормальный металл – селенид висмута под влиянием переменного напряжения и электродиффузией селена к вакансиям, при этом изменяется уровень допирования контактной области и резистивные свойства всей структуры.

#### *8.1.11 Неравновесный спиновый перенос в сверхпроводниках в условиях расщепления спиновых подзон внешним магнитным полем*

Предложен новый механизм создания неравновесных спиновых сигналов и переноса их на мезоскопические расстояния, имеющий место только в сверхпроводящем состоянии при наличии расщепления спиновых подзон внешним магнитным полем. Построена количественная теория описания таких сигналов, предсказания которой хорошо согласуются с экспериментальными результатами по данной тематике. Часть сигнала создается термализованными перегретыми электронами. При условии хорошей теплоизоляции сверхпроводящей пленки длина затухания этой части сигнала будет определяться длиной электрон-фононной релаксации, которая в сверхпроводящем состоянии может достигать сотни микрон. Эти результаты вносят вклад в одну из важнейших для развития спинтроники задач - исследование возможности надежно передавать спиновые сигналы на мезоскопические расстояния.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Проведенные комплексные исследования выявили целый ряд новых свойств электронных систем с сильными корреляциями. Среди них, исследование вихревой структуры в монокристаллах высокотемпературных сверхпроводников с искусственными центрами пиннинга, реализация элементов джозефсоновской магнитной памяти и сверхпроводящих кубитов, обнаружение слипания квантовых уровней и новых механизмов поглощения микроволнового излучения в полупроводниковых гетероструктурах, изготовление и исследование структур на основе топологических изоляторов и др. Работы целесообразно продолжить.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Абдуллаев Н.А., О.З. Алекперов, Х.В. Алигулиева, В.Н. Зверев, А.М. Керимова, Н.Т. Мамедов, «Metallic conductivity and weak antilocalization in  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$  thin films», Журнал: *Physica Status Solidi C*, 12(6), 822-825 (2015).
- 2 Долгополов В.Т. Two-dimensional electrons in (100)-oriented silicon field-effect structures in the region of low concentrations and high mobilities Письма в ЖЭТФ 101, 282 (2015)
- 3 Кулагина Т.П., Карнаух Г.Е., Вяселев О.М., Сармуткина А.С. журнал: “Влияние топологической структуры и молекулярной подвижности в полимерных сетках на сигнал стимулированного эха ЯМР”, Бутлеровские сообщения, , т.42, №5, 2015, стр.128-132.
- 4 Кулагина Т.П. Курмаз С.В., Вяселев О.М., Карнаух Г.Е., Сармуткина А.С., журнал: “Определение структуры и корреляционной функции молекулярных движений в разветвленных полиметилметакрилатах методом ЯМР”, межвузовский сборник научных статей «Известия Волгоградского государственного университета (ИзвВГТУ) серия Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов, №7(164), 2015, стр.61-64
- 5 Тулина Н. А., А. Н. Россоленко, И. Ю. Борисенко, И. М. Шмытько, А. М. Ионов, А. А. Иванов журнал: “Резистивные переключения и диодные свойства мезоскопических структур на основе оксидов ниобия”, Известия РАН. серия физическая, № 6, т. 79, 2015 с. 836–839
- 6 Bobkova I.V., A.M. Bobkov, "Long-range spin imbalance in mesoscopic superconductors under Zeeman splitting", *Pis'ma v ZhETF*, 101, 124 (2015) [*JETP Lett.* 101, 118 (2015)]
- 7 Bobkova I.V., A.M. Bobkov, " Recovering of superconductivity in S/F bilayers under spin-dependent nonequilibrium quasiparticle distribution", *Pis'ma v ZhETF*, 101, 442 (2015) [*JETP Lett.* 101, 407 (2015)].
- 8 Dolgov O.V., A.A. Golubov, Y.A. Nefyodov, A. M. Shuvaev, and M.R. Trunin Microwave Conductivity in Two-Band Superconductors  $\text{V}_{3+x}\text{Si}_{1-x}$  J. Supercond. Nov. Magn. 28, 331-377 (2015)

- 9 Egorov S.V., Bobkov A.M., Bobkova I.V., Uspenskaya, L.S. Anomalous high velocity of the domain walls driven by the electric current in bilayer permalloy-niobium structures JETP LETTERS Volume: 101 Issue: 1 Pages: 32-35 (2015)
- 10 Gasparov V.A., Xi He, G. Dubuis, D. Pavuna, N. D. Kushch, E. B. Yagubskii, J. A. Schlueter, and I. Bozovic, Magnetic field, frequency and temperature dependence of complex conductance of ultrathin  $\text{La}_{1.65}\text{Sr}_{0.45}\text{CuO}_4/\text{La}_2\text{CuO}_4$  heterostructures and the organic superconductors  $\square$ - (BEDT-TTF) $_2$  Cu[N(CN) $_2$ ] Br, International Journal of Modern Physics B 29, 1542012 (2015). IF: 0.937
- 11 Gasparov V.A. and I. Božović Complex conductance of ultrathin  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  films and heterostructures, Low Temperature Physics/Физика Низких Температур, 41, 1237–1242 (2015).
- 12 Kononov A., S.V. Egorov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, E.V. Deviatov Evidence on the macroscopic length scale spin coherence for the edge currents in a narrow HgTe quantum well Pis'ma v ZhETF, vol. 101, 913 (2015)
- 13 Kononov A., Egorov S. V., Kvon Z. D., Mikhailov N. N., Dvoretzky, S. A., Deviatov EV. Evidence on the macroscopic length scale spin coherence for the edge currents in a narrow HgTe quantum well JETP LETTERS Volume: 101 Issue: 12 Pages: 814-819 (2015)
- 14 Kononov A., Egorov S. V., Titova N., Kvon Z. D., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A., Deviatov EV Conductance oscillations at the interface between a superconductor and the helical edge channel in a narrow HgTe quantum well JETP LETTERS Volume: 101 Issue: 1 Pages: 41-46 (2015)
- 15 Melnikov M.Y. ; Shashkin A.A. ; Dolgoplov V.T. ; Huang S.H.; Liu C.W. ; Kravchenko S.V. Ultra-high mobility two-dimensional electron gas in a SiGe/Si/SiGe quantum well
- 16 Ponomareva A.K., S.V. Egorov, L.S. Uspenskaya. Effect of the shape and lateral dimensions on the magnetization reversal in permalloy nanofilms. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2015.08.034>. PHYSB309116
- 17 Prokhorova T.G., L.I. Buravov, E.B. Yagubskii, L.V. Zorina, S.V. Simonov, V.N. Zverev, R.P. Shibaeva, and E. Canadell, «Effect of the halopyridine guest molecules (G) on the structure and (super)conducting properties of the (BEDT-



TTF)4A[M(C2O4)3]G family salts». Журнал: European Journal of Inorganic Chemistry, 2015(33), 5611-5620 (2015), DOI: 10.1002/ejic.201501092.

- 18 Prokhorova G., L.I. Buravov, E.B. Yagubskii, L. . Zorina, S.V. Simonov, V.N.Zverev, R.P.Shibaeva, E. Canadell Effect of the halopyridine guest molecules (G) on the structure and (super)conducting properties of the  $\square\square$ -(BEDT-TTF)4(H3O) [Fe(C2O4)3] $\square$ G crystals Eur.J.Inorg. Chem., 34, 5611-5620 (2015)
- 19 Pushkarev Victor E., Valery V. Kalashnikov, Alexander Tolbin, Stanislav Trashin, Nataliya E. Borisova, Sergey V. Simonov, Victor Borisovich Rybakov, Larisa G. Tomilova and Nikolay S. Zefirov Meso-phenyltetraabenzotriazaporphyrin based double-decker lanthanide(III) complexes: synthesis, structure, spectral properties and electrochemistry Dalton Trans. 44 (2015) 16553-16564
- 20 Shashkin A.A.; Dolgoplov V.T. ; Clark J.W. ; Shaginyan V.R. ; Zverev, M.V.; Khodel V.A. Interaction-induced merging of Landau levels in an electron system of double quantum wells Письма в ЖЭТФ 102,36 (2015)
- 21 Skidanov Vladimir A., Petr M. Vetoshko, Fedor P. Vetoshko, Lyudmila Uspenskaya and Alexander L. Stempkovskiy. Modeling of Magnetization Distribution near Shaped Boundary of Garnet Film Core in Fluxgate Magnetometer. IEEE Transactions on Magnetism; Volume: 51 , Issue: 1 , Part: 1, Publication Year: 2015 , Article#: 7000104; DOI: 10.1109/TMAG.2014.2358083
- 22 Tikhonov E.S., M.Yu. Melnikov, D.V. Shovkun, L. Sorba, G. Biasiol, and V.S. Khrapai журнал: «Nonlinear transport and noise thermometry in quasiclassical ballistic point contacts», Phys. Rev. B 90, 161405(R)
- 23 Tikhonov E.S., D.V. Shovkun, V.S. Khrapai, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky журнал: «Shot noise of the edge transport in the inverted band HgTe quantum wells», JETP Letters, Volume 101, Issue 10, 2015, p. 787
- 24 Tikhomirov O., Large-angle scattering of light by ferroelectric domains, Physica Status Solidi (b) 252, 230-234 (2015)
- 25 Tulina N.A., A.N. Rossolenko, I.M. Shmytko, N.N. Kolesnikov, D.N. Borisenko, S.I. Bozhko, A.M. Ionov. Rectification and resistive switching in mesoscopic heterostructures based on Bi2Se3. Materials letters, 2015, v. 158, pp. 403-405

- 26 Uspenskaya Ludmila S., Egorov Sergei V., Skidanov Vladimir A.  
Transformation of the Domain-Wall Structure in Permalloy Nanotape Under  
Electrical Current Pulses IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS Volume:  
51 Issue: 1 Article Number: 4300104 Part: 1 Published: JAN 2015 DOI:  
10.1109/TMAG.2014.2352359
- 27 Veshchunov I.S., S.V. Mironov, W. Magrini, V. S. Stolyarov, A. N.  
Rossolenko, V. A. Skidanov, J.-B. Trebbia, A. I. Buzdin, Ph. Tamarat, and B.  
Lounis, журнал: «Direct Evidence of Flexomagnetolectric Effect Revealed  
by Single-Molecule Spectroscopy», Physical Review Letters, №115, 027601-1-  
027601-5, 2015
- 28 Vopilkin E.A., A.V.Chiginev, L.S.Revin, A.N.Tropanova, I.Yu.Shuleshova,  
A.I.Okhapkin, A.D.Shovkun, A.B.Kulakov and A.L.Pankratov журнал: “Quick  
and reliable technology for fabrication of stand-alone BSCCO mesas”  
Superconductor Science and Technology vol.28 (2015) 045006 (5pp)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)

УДК 538. 958, 538.9

ГР № 01201454598

Инв. № 11214-36/2115-85

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер



« 20.01 » 2016 г.

О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Межчастичные взаимодействия и коллективные явления в  
электронных и экситонных системах в полупроводниковых  
наноструктурах» (промежуточный)

Научный руководитель  
член-корр. РАН

В.Д. Кулаковский

г. Черноголовка  
2016

# СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

## Ответственные исполнители

Зам. директора ИФТТ РАН

В.Д.Кулаковский (Введение, 8.2.1-

д.ф.-м.н., член-корр. РАН

8.2.3, заключение)

Гл. н.с., д.ф.-м.н., Акад.

В.Б. Тимофеев (8.2.9)

Гл. н.с., д.ф.-м.н., член-корр. РАН

И.В.Кукушкин (8.2.5 - 8.2.7.)

Зав. Отделом., д.ф.-м.н

В.М. Эдельштейн (8.2.4)

## Исполнители:

В.Н.С., д.ф.-м.н

В.Н.С., д.ф.-м.н

В.Н.С., д.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

С.Н.С. к.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

С.Н.С., к.ф.-м.н

В.Б.Шикин (8.2.5)

И.И.Тартаковский (8.2.3)

Л.В.Кулик (8.2.9)

А.В.Ларионов (8.2.1)

С.С.Гаврилов (8.2.1, 8.2.2.)

А.А.Деменев (8.2.2)

А.А.Максимов (8.2.3)

В.М.Муравьев (8.2.6)

В.В.Соловьев (8.2.7)

А.Б.Ваньков (8.2.8)

В.Е.Бисти (8.2.9)

А.В.Горбунов (8.2.9)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 20 страниц, 25 источников

*Ключевые слова:*

КВАЗИДВУМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЭКСИТОН, ЭКСИТОННЫЕ ПОЛЯРИТОНЫ, МКРОРЕЗОНАТОРЫ, ЭФФЕКТ ХОЛЛА, СПИН-РЕШЕТОЧНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ, ПЛАЗМОНЫ, МАГНИТОПЛАЗМОНЫ, ЛАФЛИНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ

*Объектом исследования* в рамках темы «Межчастичные взаимодействия и коллективные явления в электронных и экситонных системах в полупроводниковых наноструктурах» были электронные, экситонные и поляритонные системы в полупроводниковых наноструктурах

*Целью работы* было исследование когерентных свойств и возбуждений в плотных квазидвумерных электронных и экситонных системах в полупроводниковых наноструктурах с целью их дальнейшего использования в опто- и микроэлектронике.

*В результате* в исследованиях экситон-поляритонных систем было найдено, что в микрорезонаторах с периодическим потенциалом, конденсат формируется в нескольких потенциальных минимумах, при этом корреляционная функция первого порядка для состояний в соседних минимумах на расстоянии 8 мкм достигает 0.4. В исследованиях спин-решеточной релаксация в II-VI полумагнитных полупроводниках с малой концентрацией Mn (~ 1%) было показано, что время спин-решеточной релаксации в магнитных полях до 3 Т достигает 500 мкс и затем с увеличением поля до  $B=10$  Т уменьшается до величины ~60 мкс по закону, близкому к  $\sim B^{1.5}$ . Решена задача об отражении электромагнитных волн от двумерных электронных систем с магнито-электрическими материальными

соотношениями. В исследованиях системы двумерных электронов в гетероструктурах  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  определены частоты плазменных, магнитоплазменных и краевых магнитоплазменных возбуждений, измерена зависимость массы двумерных электронов от электронной плотности, обнаружена модификация свойств электронной системы из-за сильного межэлектронного взаимодействия. Плазменные и магнитоплазменные возбуждения исследованы также в графене, в результате исследований найдено, что, несмотря на линейную дисперсию носителей заряда, гибридизация плазменных и циклотронных мод в пределе больших факторов заполнения происходит в соответствии с законом Кона.

### *Область применения*

Полученные фундаментальные результаты будут использоваться в опто- и микроэлектронике и спинтронике.

Указанные области применения объясняют высокую экономическую эффективность и значимость проведенных работ, поскольку, несмотря на небольшие объёмы финансирования, полученные результаты могут послужить основой для создания новых элементов оптоэлектронных приборов, которые найдут применение в целом ряде областей современной техники.

Важность полученных результатов обуславливает весьма положительный прогноз для продолжения указанных исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Основная часть.....	9
8.2.1 Динамика пространственной когерентности конденсата поляритонов в полупроводниковых микрорезонаторах при межзонном фотовозбуждении.....	9
8.2.2 Пространственное распределение Бозе-конденсата экситонных поляритонов в микрорезонаторах с периодическим потенциалом, созданным с помощью поверхностных акустических волн.....	9
8.2.3 Спин-решеточная релаксация в II-VI полумагнитных полупроводниках с различным содержанием магнитных примесей.....	10
8.2.4 Отражение и прохождение электромагнитных волн в гетероструктурах с двумерными электронными системами .....	10
8.2.5 Вольт-амперная характеристика образца в режиме квантового эффекта Холла, с учетом как объемной и краевой частей электрического тока.....	11
8.2.6 Краевые магнитоплазменные возбуждения в двумерной электронной системе в ZnO/MgZnO квантовых ямах .....	11
8.2.7 Эффект кулоновского взаимодействия на эффективную массу двумерных электронов в ZnO/MgZnO квантовых ямах.....	11
8.2.8 Плазменные и магнитоплазменные возбуждения в графене и изучены эффекты перенормировки скорости носителей заряда .....	12
8.2.9 Исследование коллективных состояний в двумерной электронной системе в сильном магнитном поле в GaAs/AlGaAs гетероструктурах .....	14
Заключение.....	15
Список использованных источников.....	17

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
ВАХ	Вольт-амперная характеристика
2D	Двумерный



## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Межчастичные взаимодействия и коллективные явления в электронных и экситонных системах в полупроводниковых наноструктурах» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

В настоящее время полупроводниковые гетероструктуры и микрорезонаторы используются в различных областях опто- и микроэлектроники. Требования к рабочей спектральной области, быстродействию, спектральной чувствительности и избирательности детекторов, параметрам полупроводниковых излучателей и т.д. постоянно повышаются. Это обстоятельство делает необходимыми и актуальными постоянные исследования свойств электронных и экситонных систем, используемых в полупроводниковых элементах. В особенности важны фундаментальные исследования, которые обеспечивают задел в развитии качественно новых подходов и приборов с качественно новыми свойствами. Работы, выполненные в 2015 г. являются продолжением работ ИФТТ РАН в данном направлении в течении двух десятилетий с использованием как высокой квалификации исследователей, так и развитого уникального научного и технологического оборудования как ведущих российских, так и зарубежных фирм, а также частично разработанного в стенах института. Большинство полученных в работе результатов являются принципиально новыми.

Исследования в рамках данной темы тесно связаны с работами по другим темам плана ИФТТ РАН.

В 2015 г. исследования в рамках темы «Межчастичные взаимодействия и коллективные явления в электронных и экситонных системах в полупроводниковых наноструктурах» в ИФТТ РАН проводились по следующим направлениям. В экситон-поляритонных системах исследованы динамика пространственной когерентности конденсата поляритонов в полупроводниковых микрорезонаторах при межзонном фотовозбуждении и влияние на пространственную волновую функцию конденсата модуляции экситонного потенциала с помощью поверхностных акустических волн. В спиновой системе в II-VI полумагнитных полупроводниках с малой концентрацией  $Mn \sim 1\%$  исследовано влияние на спин-решеточную релаксацию магнитного поля в диапазоне полей до 10 Т. В гетероструктурах с двумерной электронной системой исследованы (i) влияние магнито-электричества на отражение и прохождение электромагнитных волн, (ii) коллективные состояния в двумерной электронной системе в сильном магнитном поле в ультраквантовом пределе в GaAs/AlGaAs гетероструктурах, (iii) краевые магнитоплазменные возбуждения в двумерной электронной системе и эффект кулоновского взаимодействия на эффективную массу электронов в ZnO/MgZnO квантовых ямах и (iv) плазменные и магнитоплазменные возбуждения и эффекты перенормировки скорости носителей заряда в графене.

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В исследованиях использовались современные методы оптических и гальваномагнитных исследований полупроводниковых гетероструктур в широком диапазоне температур и плотностей возбуждения с использованием импульсной и квазистационарной накачки. Динамика поляритонных систем исследовалась с временным разрешением 3 пс.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *8.2.1 Динамика пространственной когерентности конденсата поляритонов в полупроводниковых микрорезонаторах при межзонном фотовозбуждении*

Исследованы динамики пространственной когерентности и распределения поляритонов в импульсном пространстве в режиме бозе-эйнштейновской конденсации при нерезонансном фотовозбуждении GaAs микрорезонатора с встроенными квантовыми ямами в активной области пикосекундными лазерными импульсами. Показано, что установление когерентности конденсата сопровождается сужением распределения поляритонов в импульсном пространстве. При больших плотностях возбуждения обнаружено качественное различие в динамическом поведении на этапе быстрой конденсации поляритонов величин когерентности, измеренной непосредственно и вычисленной из распределения поляритонов в импульсном пространстве. Это различие связано с сильной пространственной неоднородностью фазы волновой функции конденсата, установление которой происходит достаточно медленно.

#### *8.2.2 Пространственное распределение Бозе-конденсата экситонных поляритонов в микрорезонаторах с периодическим потенциалом, созданным с помощью поверхностных акустических волн.*

Исследовано формирование Бозе-конденсата экситонных поляритонов в микрорезонаторах с периодическим потенциалом, созданным с помощью поверхностных акустических волн при импульсном межзонном фотовозбуждении. Найдено, что конденсат формируется в нескольких потенциальных минимумах, находящихся на расстоянии периода потенциала

$R=8$  мкм, при этом корреляционная функция первого порядка для состояний в соседних минимумах  $g^1(R)$  достигает 0.4.

### *8.2.3 Спин-решеточная релаксация в II-VI полумагнитных полупроводниках с различным содержанием магнитных примесей*

С помощью развитого ранее оптического метода, использующего эффект гигантского Зеемановского расщепления экситонных состояний, была изучена кинетика спин-решеточной релаксации в полумагнитных полупроводниковых квантовых ямах первого и второго типа на основе (Zn,Mn)Se с малой концентрацией Mn  $\sim 1\%$  в различных магнитных полях, изменяющихся в диапазоне от 0.5 до 10 Т. Обнаружено, что в магнитных полях  $< \sim 3$  Т, время спин-решеточной релаксации слабо зависит от величины магнитного поля, изменяясь в пределах 510 – 460 микросекунд. В магнитных полях В от 3 до 10 Т, происходит ускорение спин-решеточной релаксации, время уменьшается до величины  $\sim 60$  мкс в поле 10 Т по закону близкому к  $\sim B^{(1.5 - 1.7)}$ .

### *8.2.4 Отражение и прохождение электромагнитных волн в гетероструктурах с двумерными электронными системами*

Рассмотрено обобщение теории Максвелла на проводящие среды с нарушенной зеркальной симметрией кристаллической решетки. Спин-орбитальное взаимодействие, существующее в таких структурах, придает им магнито-электрические свойства, а именно, электрическое поле способно вызывать намагниченность, а магнитное поле дает вклад в электрический ток. Решена задача об отражении электромагнитных волн от двумерных электронных систем с магнито-электрическими материальными соотношениями и найдено влияние магнито-электричества на амплитуды прохождения и отражения».

#### *8.2.5 Вольт-амперная характеристика образца в режиме квантового эффекта Холла, с учетом как объемной и краевой частей электрического тока.*

Исследована вольт-амперная характеристика образца, находящегося в режиме квантового эффекта Холла, с учетом как объемной части электрического тока, так и краевой составляющей. Показано, что одной из причин разнообразия в поведении ВАХ может служить участие диффузии в ее формировании. Аномальность такого влияния зависит от «качества» плотности состояний замагниченной 2Д проводящей системы. Диффузионная гипотеза доведена до конкретных результатов, дающих возможность объяснить наблюдаемую разницу между ВАХ в разных работах.

#### *8.2.6 Краевые магнитоплазменные возбуждения в двумерной электронной системе в ZnO/MgZnO квантовых ямах*

Методом оптического детектирования резонансного микроволнового поглощения исследованы свойства плазменных, магнитоплазменных и краевых магнитоплазменных возбуждений в системе двумерных электронов в гетероструктурах MgZnO/ZnO. Из зависимости дисперсии магнитоплазменных возбуждений от магнитного поля измерена масса двумерных электронов и ее изменение при вариации электронной плотности. Обнаружена необычно сильная зависимость массы двумерных электронов от их концентрации, которую невозможно объяснить только одночастичными эффектами, связанными с непараболичностью зоны проводимости.

#### *8.2.7 Эффект кулоновского взаимодействия на эффективную массу двумерных электронов в ZnO/MgZnO квантовых ямах*

Исследовано проявление эффектов кулоновского взаимодействия в спектрах излучательной рекомбинации двумерных электронов в гетероструктурах ZnO/MgZnO. Наряду с перераспределением интенсивности в спектре фотолюминесценции двумерной электронной системы к его «синему» краю, к границе фермиевского заполнения, а также драматического усиления сигнала отражения точно на границе раздела пустых и заполненных электронных состояний, обнаруживается и модификация свойств самой электронной системы ввиду межэлектронного взаимодействия (которое характеризуется тем же параметром, что и электрон-дырочное притяжение). В результате энергетическая ширина спектра фотолюминесценции соответствует не фермиевской энергии двумерных электронов зоны проводимости (которая уже не является хорошо определенной величиной при наличии взаимодействия между электронами), а разнице в энергиях «дырок» в Ферми-море, создаваемой при нулевом и фермиевском импульсах, соответственно. Величины этих энергий в полной мере содержат в себе вклад электрон-электронного взаимодействия, и позволяют определить величину данного эффекта. Обнаружено, что по мере уменьшения электронной концентрации на гетеропереходе MgZnO/ZnO от величины  $2.3 \times 10^{12}$  до  $3.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , эффективная масса этих дырок, определяемая в предположении их квадратичного закона дисперсии и совпадающая с массой электрона в отсутствии взаимодействия, удваивается.

#### *8.2.8 Плазменные и магнитоплазменные возбуждения в графене и изучены эффекты перенормировки скорости носителей заряда.*

Методом неупругого рассеяния света впервые исследованы свойства плазменных и магнитоплазменных возбуждений в свободно подвешенном графене. Для этой цели создана установка, позволяющая с помощью криогенных пьезо-сканеров находить в криостате с магнитом графеновые структуры, подвешенные на контактах, и измерять в них спектры неупругого

рассеяния света с пространственным разрешением 2 микрона. Помимо одночастичных возбуждений, связанных с переходами между пустыми уровнями Ландау электронов и дырок, впервые обнаружены коллективные плазменные и магнитоплазменные возбуждения в системе электронов (и дырок) различной плотности. Показано, что, несмотря на линейную дисперсию носителей заряда в графене, гибридизация плазменных и циклотронных мод в пределе больших факторов заполнения происходит в соответствии с законом Кона, что позволяет прямым способом измерять циклотронную энергию и перенормированную скорость электронов и дырок.

Измерена зависимость дисперсии плазменных волн от импульса, от электронной плотности и от магнитного поля. Из зависимости энергии магнитоплазменных возбуждений от магнитного поля исследовано как в подвешенном графене изменяется скорость электронов и дырок от их концентрации. Обнаружен эффект сильной перенормировки дисперсии электронов и дырок, заключающийся в увеличении скорости (на 40-50%) при уменьшении концентрации носителей заряда вплоть до  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Показано, что эффект перенормировки скорости электронов и дырок оказывается максимальным для подвешенного графена и значительно подавлен для графена, лежащего на двуокиси кремния. Этот факт указывает на то, что перенормировка скорости определяется межэлектронным взаимодействием. В подвешенном графене, а также в графене, лежащем на поверхности двуокиси кремния измерены зависимости ширины магнитоплазменных резонансов от концентрации электронов и дырок и показано, что минимальная ширина резонанса составляет 4 мэВ и 16 мэВ и отвечает концентрациям  $2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , соответственно, в первом и во втором случае.

### *8.2.9 Исследование коллективных состояний в двумерной электронной системе в сильном магнитном поле в GaAs/AlGaAs гетероструктурах.*

Исследовано резонансное отражение света двумерной электронной системой в GaAs/AlGaAs гетероструктурах в сильном магнитном поле в ультраквантовом пределе. В спектрах отражения обнаружена новая линия. Аналогичных спектральных особенностей не наблюдается ни в спектрах люминесценции, ни в спектрах резонансного релеевского рассеяния. Обнаруженная линия связана с формированием в электронной системе лафлиновской жидкости



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Ниже приведены краткие выводы по результатам выполнения НИР. В исследованиях экситон-поляритонных систем найдено, что установление когерентности конденсата сопровождается сужением распределения поляритонов в импульсном пространстве, в микрорезонаторах с периодическим потенциалом, конденсат формируется в нескольких потенциальных минимумах, при этом корреляционная функция первого порядка для состояний в соседних минимумах на расстоянии 8 мкм достигает 0.4. В исследованиях спин-решеточной релаксации в II-VI полумагнитных полупроводниках найдено, что при малой концентрации Mn (~ 1%) время спин-решеточной релаксации лежит в пределах 510 – 460 мкс в магнитных полях до 3 Т и затем уменьшается до величины ~60 мкс в поле  $B=10$  Т по закону, близкому к  $\sim B^{1.5}$ .

В исследованиях свойств структур с двумерной электронной системой решена задача об отражении электромагнитных волн от двумерных электронных систем с магнито-электрическими материальными соотношениями. В системе двумерных электронов в гетероструктурах MgZnO/ZnO исследованы свойства плазменных, магнитоплазменных и краевых магнитоплазменных возбуждений, измерена зависимость массы двумерных электронов от электронной плотности, обнаружена модификация свойств электронной системы из-за сильного межэлектронного взаимодействия вследствие малой диэлектрической проницаемости. Плазменные и магнитоплазменные возбуждения исследованы также в графене и показано, что, несмотря на линейную дисперсию носителей заряда в графене, гибридизация плазменных и циклотронных мод в пределе больших факторов заполнения происходит в соответствии с законом Кона.

Задачи, поставленные в госзадании ИФТТ РАН, полностью решены. Проведенные комплексные исследования выявили новые свойства электронных спиновых систем. Полученные результаты находятся на

мировом уровне. Об этом свидетельствует публикация полученных данных в ведущих международных журналах, таких как Phys Rev Lett. Scientific Reports, Phys Rev. и ведущих российских научных журналах- Письма ЖЭТФ и Успехи физических наук. Полученные фундаментальные результаты найдут своё применение в опто- и микроэлектронике. Указанные области применения объясняют высокую экономическую эффективность и значимость проведенных работ. Важность полученных результатов обуславливает весьма положительный прогноз для продолжения указанных исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Тимофеев В.Б. "Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур" С.-Пб.: Издательство "Лань"(учебник для ВУЗ'ов), 2015. с.507
- 2 Бисти В.Е., А.Б. Ваньков, А.С. Журавлев, Л.В. Кулик, "Магнитоэкситоны в двумерных электронных системах", журнал: Успехи физических наук, т.185, N4, 337 (2015).
- 3 Горбунов А.В., В.Б. Тимофеев журнал: «Непрямые в реальном и импульсном пространстве дипольные экситоны в гетероструктуре GaAs/AlAs» – ФТП т.49, 2015, №1, стр.47-52
- 4 Губарев С. И., В. М. Муравьев, И. В. Андреев, В. Н. Белянин, И. В. Кукушкин журнал: «Исследование краевых магнитоплазменных возбуждений в двумерной электронной системе с сильным экранированием», Письма в ЖЭТФ т. 102, № 7, стр. 517 (2015)
- 5 Губарев С.И., В.М. Муравьев, И.В. Андреев, В.Н. Белянин, И.В. Кукушкин «Краевые магнитоплазменные возбуждения в двумерной электронной системе с сильным экранированием», Письма в ЖЭТФ, 102, (2015).
- 6 Деменев А.А., С.С. Гаврилов, С.И. Новиков, Д.Н. Крижановский, В.Д. Кулаковский журнал: "Влияние модуляции поляритонного потенциала на поляризационную неустойчивость сигнала стимулированного поляритон-поляритонного рассеяния в планарных GaAs микрорезонаторах"; Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 5, 2015, стр. 365 –371.
- 7 Лебедев М.В., А.Л. Парахонский, А.А. Деменев журнал: "Генерация неклассического света при резонансном возбуждении полупроводникового микрорезонатора"; Письма в ЖЭТФ, том 102, вып. 8, 2015, стр. 571 –576.
- 8 Мыльников Д.А., В.В. Белых, Н.Н. Сибельдин, В.Д. Кулаковский К. Шнайдер, С. Хофлинг, М. Камп и А. Форхел Динамика пространственной когерентности и распределения поляритонов по импульсам в

полупроводниковом микрорезонаторе в режиме Бозе-эйнштейновской конденсации Письма ЖЭТФ 101, 569 (2015)

9 Черненко А.В. «Механизмы безызлучательной рекомбинации экситонов в полумагнитных квантовых точках» Физика и техника полупроводников, 49, 1629 (2015)

10 Bisti V.E., A.S. Zhuravlev, L.V. Kulik. Resonant Rayleigh scattering by 2DES in high magnetic field. Physica B: Condensed Matter, Volume 460, 1 March 2015, Pages 245-247.

11 Chikina I., S.Nazin, V.Shikin, "On stability of the liquid –vapor interface in external electric field", Physica B 460 (2015) 129-132

12 Del Pozo-Zamudio O., S. Schwarz, M. Sich, A. Akimov, M. Bayer, R.C. Schofield, E.A. Chekhovich, B.J. Robinson, N.D. Kay, O. Kolosov, A.I. Dmitriev, G.V. Lashkarev, D.N. Borisenko, N.N. Kolesnikov, A.I. Tartakovskii. Photoluminescence of two-dimensional GaTe and GaSe films. 2D Materials, 2015, v. 2, 035010.

13 Edelstein V.M. "Magneto-optical signature of broken mirror symmetry of two-dimensional conductors" Письма в ЖЭТФ, т. 102, №11, 2015 стр. 853- 858.

14 Gavrilov S.S., N.A. Gippius, C. Schneider, S. Höfling, and V. D. Kulakovskii "Spontaneous breaking of spin symmetry and fast spin switches in resonantly excited cavity-polariton condensates" International Conference "Spin physics, spin chemistry and spin technology 2015 <http://spinconf.com/index.php/invited-speakers>

15 Gusikhin P.A., V.M. Muravev, I.V. Kukushkin журнал: « Dispersion of volume relativistic magnetoplasma excitation in a gated two-dimensional electron system», JETP Lett. vol. 102, №11, 859-863 (2015)

16 Kukushkin V. I., I.M. Mukhametzhanov, I.V. Kukushkin, V.D. Kulakovskii, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, A.A. Toropov, S.V. Ivanov, A.S. Sobolev "Control of

semiconductor quantum dot emission intensity and polarization by metal nano-antennas”, International conference on II-VI materials, Paris, 2015.

17 Larionov A.V., L.V. Kulik, S. Dickmann, and I.V. Kukushkin. Goldstone mode stochastization in a quantum Hall ferromagnet. Phys. Rev. B 92, 165417 (2015).

18 Lobanov S V., T Weiss, NA. Gippius, S G. Tikhodeev, VD. Kulakovskii, K Konishi, and M. Kuwata-Gonokami Polarization control of quantum dot emission by chiral photonic crystal slabs OPTICS LETTERS 40 1528 (2015)

19 Lobanov S.V., S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, A.A. Maksimov, E.V. Filatov, I.I. Tartakovskii, V D. Kulakovskii, T. Weiss, C. Schneider, J. Gessler, M. Kamp, S. Höfling. “Controlling circular polarization of light emitted by quantum dots using chiral photonic crystal slab”, PHYSICAL REVIEW B 92, 205309 (2015)

20 Muravev V.M., P.A. Gusikhin, I.V. Andreev, I.V. Kukushkin .“Novel Relativistic Plasma Excitations in a Gated Two-Dimensional Electron System” PHYSICAL REVIEW LETTERS, 114, 106805 (2015)

21 Parakhonsky A.L., M.V. Lebedev, A.A. Dremin, I.V. Kukushkin “Correlation and spectral aspects of giant optical fluctuations of 2D electrons” PHYSICA E, v. 65, 1-3 (2015)

22 Solovyev V.V., A.B. Van'kov, I.V. Kukushkin, J. Falson, D. Zhang, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, J. H.Smet, and M. Kawasaki, “Optical probing of MgZnO/ZnO heterointerface confinement potential energy levels” источник финансирования: РФФИ 14-12-00693 журнал: Applied Phys. Letters 106, v. 8, 082102 (2015).

23 Winkler K.; Gold P.; Bradel B., Reitzenstein S, V. D. Kulakovskii, Kamp M , Schneider C, Hoeftling S Photocurrent readout and electro-optical tuning of resonantly excited exciton polaritons in a trap Phys Rev B 91, 045127 (2015)

24 Zhukov A.A., Ch. Volk, A. Winden, H. Hardtdegen, Th. Schaepers. журнал: “Cor-relations of mutual positions of charge density waves nodes in side-by-side placed InAs wires measured with scanning gate microscopy”, JETP Lett. 101, 628-632 (2015).

25 L. V. Kulik, A. V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V. B. Timofeev, S. Dickmann & I. V. Kukushkin. Super-long life time for 2D cyclotron spin-flip excitons. Sci. Rep. 5, 10354; doi: 10.1038/srep10354 (2015).

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.91, 538.95, 535

ГР № 01201454596

Инв. № *11214-36/2115-86*

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор ИФТТ РАН**

**член-корр. РАН**

**В.В. Кведер**

**» 2016 г.**



**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Самоорганизация наноструктурированных систем и физика дефектов в  
полупроводниках и диэлектриках» (промежуточный)**

**Научный руководитель  
член-корр. РАН**

**В.В. Кведер**

**г. Черноголовка  
2016**

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Директор ИФТТ РАН

В.В.Кведер (Введение, 8.3.5,

д.ф.-м.н., член-корр. РАН

закключение)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

С.Н.Молотков (8.3.3)

### Исполнители:

в.н.с., д.ф.-м.н

В.Ю. Аристов (8.3.1)

в.н.с., д.ф.-м.н

А.М.Ионов (8.3.2)

в.н.с., д.ф.-м.н

Э.А.Штейнман (8.3.6)

с.н.с., к.ф.-м.н

А.Н.Чайка (8.3.1)

с. н.с., к.ф.-м.н

С.И.Божко (8.3.3)

Зав. лаб. к.ф.-м.н

Н. В.Классен (8.3.4)

с. н.с., к.ф.-м.н

Т.Н.Фурсова (8.3.4)

н.с., к.ф.-м.н

М.А.Хорошева (8.3.5)

н.с., к.ф.-м.н

А.Н.Терещенко (8.3.6)



## РЕФЕРАТ

Отчет: 18 страниц, 14 источников

*Ключевые слова:* НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ ГРАФЕН, СИЛИЦИД ГАДОЛИНИЯ, КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ, НАНОЧАСТИЦЫ, НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ, ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ, ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

*Объектом исследования* в рамках темы «Самоорганизация наноструктурированных систем и физика дефектов в полупроводниках и диэлектриках» являются однородное покрытие трехслойного графена, состоящее из нанодоменов с одним предпочтительным направлением междоменных границ, ультратонкие слои силицида гадолия на Si(111), упорядоченные низкоразмерные структуры атомов гадолия на ступенчатых поверхностях кремния, сверхдлинные цепочки наночастиц, дислокации и вакансионные дефекты в плоскостях скольжения, дислокационные монокристаллы кремния с различной концентрацией акцепторов.

*Целью работы* является создание фундаментальных основ процессов самоорганизации наноструктурированных систем в полупроводниках и диэлектриках.

*Результаты работы:*

- На вицинальной подложке SiC(001)/Si(001) синтезировано и исследовано однородное покрытие трехслойного графена. Изучены транспортные свойства трехслойного АВА-графена, синтезированного на низкоиндексной и вицинальной поверхностях SiC(001) и продемонстрировано открытие транспортной щели в системе нанополос графена при низких температурах.

- Проведены СТМ-исследования поверхностных реконструкций Gd/Si(557) при малых покрытиях (от 0.2 до 10 монослоев) атомов металла. Выполнены расчеты электронной структуры взаимодействующих атомов острия и поверхности при различных параметрах туннелирования и трех возможных вариантах упаковки вакансий атомов кремния в приповерхностных слоях.

- Предложен новый протокол квантовой криптографии с опорным когерентным состоянием.

- Показано, что обнаруженное ранее формирование сверхдлинных цепочек наночастиц при лазерном или электрическом испарении металлов основано на образовании турбулентных микровихрей двух видов.

- Обнаружено, что движение дислокаций в кремнии при относительно низких температурах (порядка 600°С) приводит к генерации в их плоскостях скольжения большого количества неизвестных ранее вакансионных дефектов. Показано, что эти дефекты вступают в реакцию с атомами золота, но не реагируют с атомами никеля.

- Обнаружено сильное влияние имплантационных доз ионов В<sup>+</sup> на спектр дислокационной люминесценции в кремнии в области длинноволновой полосы D2. В исследуемых образцах обнаружена нетипичная для дислокационной люминесценции в кремнии температурная зависимость и определено влияние доз ионов В<sup>+</sup> на эту зависимость.

### *Область применения*

Полученные в ходе выполнения НИР в 2015 году фундаментальные результаты необходимы для дальнейшего развития физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости и т.д. Полученные результаты будут использоваться в микроэлектронной промышленности, солнечной энергетике, оптоэлектронных приложениях, создании устройств прямого преобразования ионизирующих излучений в электричество, а также

будут применены при разработке новых элементов микро- и нанoeлектроники (высокочастотных транзисторов, ячеек памяти, сенсоров и ключей). Кроме вышеперечисленного, полученные результаты важны для развития методик зондовой микроскопии атомарного разрешения и разработки новых прецизионных методов анализа поверхностей полупроводников и металлов. Указанные области применения объясняют высокую экономическую эффективность и значимость проведенных работ, поскольку полученные фундаментальные результаты могут стать основой прорывных технологий в целом ряде областей современной техники.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
Основная часть.....	12
Важнейшие результаты исследований.....	12
8.3.1. Низкоразмерные структуры на вицинальных поверхностях.....	12
8.3.2. Наноструктуры на базе топологических изоляторов .....	12
8.3.3. Квантовая криптография .....	13
8.3.4. Механизм формирования сверхдлинных наноцепочек .....	13
8.3.5. Электронные свойства дислокаций и связанных с ними дефектов в кремнии.....	14
8.3.6. Излучательная рекомбинация на дислокациях в дырочном кремнии.....	14
Заключение.....	15
Список источников.....	17

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР Научно-исследовательская работа

СТМ Сканирующая туннельная микроскопия

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Самоорганизация наноструктурированных систем и физика дефектов в полупроводниках и диэлектриках» (Раздел II. "Физические науки», подраздел 8. "Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости") является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Работы по теме «Самоорганизация наноструктурированных систем и физика дефектов в полупроводниках и диэлектриках» являются на современном этапе необходимыми и весьма актуальными по ряду причин. Так, в настоящий момент в различных исследовательских центрах мира ведутся работы по синтезу и изучению свойств графена на пластинах карбида кремния с целью применений в приборах электроники (в особенности, в высокочастотных устройствах). Основные проблемы связаны с высокой стоимостью монокристаллических пластин из гексагональной модификации карбида кремния, а также с возможностями контролировать толщину синтезированного на SiC графенового покрытия, размеры доменов и ориентацию междоменных границ. Стоимость подложек может быть значительно уменьшена при использовании тонких пленок кубической модификации карбида кремния, выращиваемых на стандартных кремниевых пластинах большого диаметра. Исследования графеновых покрытий на

подобных подложках к настоящему моменту докладывались лишь в небольшом количестве работ.

Исследования атомной структуры и физических свойств низкоразмерных (цепочечных и планарных) структур атомов металлов на поверхностях кремния ведутся в ряде исследовательских групп. Однако, лишь небольшое количество работ было посвящено исследованию реконструкций атомов редкоземельных металлов на ступенчатых поверхностях кремния с большим отклонением от плоскости Si(111), что связано со сложностью формирования регулярных систем ступеней на кремниевых матрицах-подложках и сложностями формирования и контроля упорядоченных структур атомов редкоземельных металлов из-за их высокой химической активности. Массивы квазиодномерных и квазидвумерных систем атомов редкоземельных металлов на кремниевых подложках представляют интерес в связи с возможными проявлениями уникальных свойств (транспортных, магнитных) и использованием для создания новых наноструктур для приборов наноэлектроники и спинтроники. Исследования механизмов формирования сверхдлинных наноцепочек определяют перспективы применения самоорганизации наночастиц в поле лазерного излучения для формирования микропериодических структур с функциями фотонных кристаллов и метаматериалов, которые представляют большой интерес для оптоэлектроники, оптоволоконной связи, солнечной энергетики и т.д. Следует отметить, что бурный рост производства кремниевых солнечных элементов стал возможен, во многом благодаря «инженерии дефектов», позволившей производить высокоэффективные солнечные элементы из относительно дешевого литого «мульти-кристаллического» кремния, содержащего, помимо вредных примесей, много дислокаций и других дефектов. В связи с этим, в мире продолжают интенсивные исследования электронных свойств дислокаций и связанных с ними дефектов в кремнии. В свою очередь, процессы электрон-дырочной рекомбинации в таком непрямозонном полупроводнике, как кремний, привлекают внимание многих

исследовательских групп в мире в связи с возможностью развития кремниевой оптоэлектроники. Подходы, развиваемые ИФТТ РАН в этом направлении, в частности, применение процессов излучательной рекомбинации на дислокационных структурах, демонстрируют несомненную перспективу проводимых исследований и их необходимость.

Работы 2015 г. основаны на достигнутом в ИФТТ РАН научно-техническом заделе, квалификации исследователей, полученных патентах, и существующем уникальном оборудовании, частично разработанном в стенах института. Большинство полученных в работе результатов являются принципиально новыми. Исследования в рамках данной темы тесно связаны с работами по другим темам плана ИФТТ РАН.

В 2015 г. исследования в рамках темы «Самоорганизация наноструктурированных систем и физика дефектов в полупроводниках и диэлектриках» в ИФТТ РАН проводились по шести главным направлениям. В частности, изучались низкоразмерные структуры на вицинальных поверхностях и наноструктуры на базе топологических изоляторов. С помощью СТМ высокого разрешения определена атомная структура нанодоменов и междоменных границ. Методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением определен порядок чередования слоев в трехслойном графене на поверхности кубического карбида кремния SiC(001). Изучены транспортные свойства трехслойного АВА-графена, синтезированного на низкоиндексной и вицинальной поверхностях SiC(001). Продemonстрировано открытие транспортной щели в системе нанополос графена при низких температурах. Было продолжено аналитическое и численное исследование обнаруженного ранее явления формирования сверхдлинных цепочек наночастиц при лазерном или электрическом испарении металлов, изучены механизмы их формирования. Получен патент на устройство прямого преобразования ионизирующих излучений в электричество. Были исследованы электронные свойства дислокаций и



связанных с ними дефектов в кремнии, а также особенности излучательной рекомбинации в дислокационных системах дырочного кремния. Обнаружена нетипичная для дислокационной люминесценции в кремнии температурная зависимость и определено влияние концентрации акцепторной примеси на эту зависимость.

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИИР*

В работе использовались современные методы синтеза однородных покрытий нанотекстурированного графена, создания ультратонких слоев силицида гадолиния на Si(111), уникальные методы формирования сверхдлинных цепочек наночастиц и генерации дефектов кристаллической структуры полупроводников с заданными свойствами. Объекты проводимых исследований изучались с помощью сканирующей туннельной микроскопии и электронной спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, обычной и высокоразрешающей просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, оптической микроскопии, измерениями тока, индуцированного световым пучком, нестационарной спектроскопии глубоких уровней, времяпролетной вторично-ионной масспектрометрии и низкотемпературной фотолюминесценции.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *8.3.1. Низкоразмерные структуры на вицинальных поверхностях.*

На технологичной вицинальной подложке SiC(001)/Si(001) синтезировано и исследовано с помощью сканирующей туннельной микроскопии и электронной спектроскопии однородное покрытие трехслойного графена, состоящее из нанодоменов с одним предпочтительным направлением междоменных границ. С помощью СТМ высокого разрешения определена атомная структура нанодоменов и междоменных границ. Методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением определен порядок чередования слоев в трехслойном графене на поверхности кубического карбида кремния SiC(001). Изучены транспортные свойства трехслойного АВА-графена, синтезированного на низкоиндексной и вицинальных поверхностях SiC(001). Продемонстрировано открытие транспортной щели в системе нанополос графена при низких температурах.

#### *8.3.2. Наноструктуры на базе топологических изоляторов*

Проведены СТМ-исследования поверхностных реконструкций Gd/Si(557) при малых покрытиях (от 0.2 до 10 монослоев) атомов металла. Изучены зависимости СТМ-изображений ультратонких слоев силицида гадолиния на Si(111) от параметров туннелирования при использовании чистого и модифицированного атомом кислорода вольфрамового зонда. Выполнены расчеты электронной структуры взаимодействующих атомов острия и поверхности при различных параметрах туннелирования и трех возможных вариантах упаковки вакансий атомов кремния в приповерхностных слоях. Результаты эксперимента и теоретических расчетов демонстрируют высокую чувствительность СТМ к структуре вакансий в пяти верхних слоях силицида гадолиния.

### *8.3.3. Квантовая криптография*

Предложен новый протокол квантовой криптографии с опорным когерентным состоянием. Доказана его криптостойкость в зависимости от параметров системы. Впервые получена верхняя и нижняя оценка для сложности по тотальному перебору ключей, получаемых в системах квантовой криптографии. Установлена явная связь между переборным критерием и следовым расстоянием, используемым в квантовой криптографии.

### *8.3.4. Механизм формирования сверхдлинных наноцепочек*

Показано, что обнаруженное ранее формирование сверхдлинных цепочек наночастиц при лазерном или электрическом испарении металлов основано на образовании турбулентных микровихрей двух видов. Если микрокапля металла, как при электровзрыве молибдена, сама при своем пролете через воздух генерирует высокую скорость и температуру парового потока за счет активного окисления металла и вскипания окисла, возникает кружевоподобная система микроколец фрактального типа. Концентрация пара достигает плотности конденсированной среды за счет центробежной силы быстро вращающегося вихря. При этом образование непрерывных наноцепочек, а не дисперсных наночастиц можно объяснить тем, что окисление головных наночастиц потоком встречного воздуха приводит к их торможению за счет реактивной отдачи и сгущению паров в их следовых каналах. При лазерном испарении металлов преобладают линейчатые паровые струи ниточного типа, которые конденсируются в квазилинейные непрерывные цепочки наночастиц. По этим результатам получен патент на устройство прямого преобразования ионизирующих излучений в электричество.

### *8.3.5. Электронные свойства дислокаций и связанных с ними дефектов в кремнии*

Экспериментально обнаружено, что движение дислокаций в кремнии при относительно низких температурах (порядка 600°C) приводит к генерации в их плоскостях скольжения большого количества неизвестных ранее вакансионных дефектов. Большая часть этих дефектов исходно электрически неактивна, но они проявляются за счет их реакций с атомами некоторых переходных металлов, существенно увеличивая концентрацию этих атомов в узлах решетки. Показано, что эти дефекты вступают в реакцию с атомами золота, но не реагируют с атомами никеля.

### *8.3.6. Излучательная рекомбинация на дислокациях в дырочном кремнии.*

Исследованы особенности спектров низкотемпературной фотолюминесценции образцов Si с дислокациями, имплантированных ионами В<sup>+</sup> различной концентрации. Обнаружено сильное влияние имплантационных доз ионов В<sup>+</sup> на спектр дислокационной люминесценции в области длинноволновой полосы D2. В исследуемых образцах обнаружена нетипичная для дислокационной люминесценции в кремнии температурная зависимость и определено влияние доз ионов В<sup>+</sup> на эту зависимость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзадаaniem ИФТТ РАН. Ниже приведены краткие выводы по результатам выполнения НИР. На вицинальной подложке SiC(001)/Si(001) синтезировано и исследовано однородное покрытие трехслойного графена. Определена атомная структура нанодоменов и междоменных границ. Определен порядок чередования слоев в трехслойном графене на поверхности кубического карбида кремния SiC(001). Изучены транспортные свойства трехслойного АВА-графена, синтезированного на низкоиндексной и вицинальной поверхностях SiC(001). Продемонстрировано открытие транспортной щели в системе нанополос графена при низких температурах. Проведены СТМ-исследования поверхностных реконструкций Gd/Si(557) при малых покрытиях (от 0.2 до 10 монослоев) атомов металла. Выполнены расчеты электронной структуры взаимодействующих атомов острия и поверхности при различных параметрах туннелирования и трех возможных вариантах упаковки вакансий атомов кремния в приповерхностных слоях. Предложен новый протокол квантовой криптографии с опорным когерентным состоянием. Показано, что обнаруженное ранее формирование сверхдлинных цепочек наночастиц при лазерном или электрическом испарении металлов основано на образовании турбулентных микровихрей двух видов. Получен патент на устройство прямого преобразования ионизирующих излучений в электричество. Обнаружено, что движение дислокаций в кремнии при относительно низких температурах (порядка 600°С) приводит к генерации в их плоскостях скольжения большого количества неизвестных ранее вакансионных дефектов. Показано, что эти дефекты вступают в реакцию с атомами золота, но не реагируют с атомами никеля. Обнаружено сильное влияние имплантационных доз ионов В<sup>+</sup> на спектр дислокационной люминесценции в кремнии в области длинноволновой полосы D2. В исследуемых образцах обнаружена нетипичная для дислокационной люминесценции в кремнии

температурная зависимость и определено влияние доз ионов В<sup>+</sup> на эту зависимость.

Задачи, поставленные в госзадании ИФТТ РАН, полностью решены. Полученные результаты находятся на мировом уровне. Об этом свидетельствует участие в исследованиях партнеров из ведущих зарубежных научных учреждений, обнародование результатов на международных научных конференциях и публикация полученных данных в ведущих научных журналах. Полученные фундаментальные результаты найдут своё применение в микроэлектронной промышленности, солнечной энергетике, оптоэлектронных приложениях, создании устройств прямого преобразования ионизирующих излучений в электричество, а также будут применены при разработке новых элементов микро- и нанoeлектроники (высокочастотных транзисторов, ячеек памяти, сенсоров и ключей). Кроме вышеперечисленного, полученные результаты важны для развития методик зондовой микроскопии атомарного разрешения и разработки новых прецизионных методов анализа поверхностей полупроводников и металлов. Проведенные комплексные исследования также выявили новые свойства электронных спиновых систем. Работы целесообразно продолжить.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Божко С.И., Е.А. Левченко, В.Н. Семёнов, М.Ф. Булатов, И.В. Швец Динамика вращения молекул C<sub>60</sub> в монослойной плёнке фуллерена на поверхности WO<sub>2</sub> / W(110) вблизи вращательного фазового перехода ЖЭТФ, т. 147, вып. 5, стр. 962, 2015
2. Божко С.И., А.М. Ионов, А.Н. Чайка. «Поверхности Si(hhm): полигон для создания наноструктур». ФТП, 49 (6), 772-778 (2015)
3. Молотков С.Н. «Какой протокол квантовой криптографии обеспечивает максимальную дальность в случае создания строго однофотонного источника» Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 102, N 7, 2015, стр. 530-535
4. Молотков С.Н. «Аналог дифференциально-фазовой квантовой криптографии на когерентных состояниях с доказуемой криптографической стойкостью» Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 102, N 6, 2015, стр. 436-443
5. Молотков С.Н. «О секретности волоконных систем кантовой криптографии без контрол интенсивности квазиоднофотонных когерентных состояний» Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 101, N 8, 2015, стр. 637-643
6. Bozhko S.I., A.S. Ksenz, A.M. Ionov, D.A. Fokin, V. Dubost, F. Debontridder, T. Cren, D. Roditchev. «Simulation of Lead Nanoislands Growth using Density Functional Theory» Physics Procedia, 71, 2015, Pages 332–336.
7. Feklisova O.V., V.I. Orlov and E.B. Yakimov «EBIC and LBIC investigations of dislocation trails in Si» Physica Status Solidi (c) V 12, Issue 8, pages 1081–1084, August 2015
8. Han-Chun Wu, Alexander N. Chaika, Tsung-Wei Huang, Askar Syrlybekov, Mourad Abid, Victor Yu. Aristov, Olga V. Molodtsova, Sergey V. Babenkov, Dmitry Marchenko, Jaime Sánchez-Barriga, Partha S. Mandal, Andrei Yu. Varykhalov, Yuran Niu, Barry E. Murphy, Sergey A. Krasnikov, Olaf Lübben, Jing-Jing Wang, Huajun Liu, Li Yang, Hongzhou Zhang, Mohamed Abid, Jahya T. Janabi, Sergei N. Molotkov, Ching-Ray Chang, and Igor V. Shvets. Transport Gap Opening and High On-Off Current Ratio in Trilayer Graphene with Self-Aligned Nanodomain Boundaries. Журнал: ACS Nano 9, 8967-8975 (2015).

9. Khorosheva, M. A., Kveder V.V., V.; Seibt, M., «On the nature of defects produced by motion of dislocations in silicon», Phys. Status Solidi A, 212 (8), 1695-1703, (2015)
10. KRAVTSOV K.S., I.V. RADCHENKO, S.P. KULIK, S.N. MOLOTKOV  
журнал: «Minimalist design of a robust real-time quantum random number generator» Journal of Optical Society of America, т.32, N 8, 2015, стр.1743-1747
11. Mozhchil R.N., Menushenkov A.P., Ionov A.M. , Bozhko S.I. , Rumyantseva V.D. c, Trigub A.L. Electronic and atomic structure studies of rare earth metalloporphyrins by XAFS Physics Procedia, Volume 71, 2015, Pages 318-322
12. Privezentsev V., V. Kulikauskas, E. Steinman, A. Tereshchenko, A. Bazhenov, N. Tabachkova, A. Batrakov “Properties of near-surface layer of  $^{64}\text{Zn}^+$  ion hot-implanted Si”, Phys. Status Solidi C 12, N. 8, 1170–1174 (2015)
13. Smirnov A.A., S.I. Bozhko, A.M. Ionov, S.G. Protasova, S.V. Chekmazov, A.A. Kapustin. Журнал: «Sb (111) abnormal behavior under ion etching» Physics Procedia, 71, 2015, p. 327 – 331.
14. Tereshchenko A.N., E.A. Steinman, A.A. Mazilkin, M.A. Khorosheva, O. Kononchuk “Structures and Electronic Properties of Defects on the Borders of Silicon Bonded Wafers”, Russian Microelectronics, V. 44, N. 8, 585–589, (2015)



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)

УДК 538.911, 538.955

ГР № 01201454594

Инв. № 11214-36/2115-87

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

» 2016 г.



## О Т Ч Е Т

### О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Фазовые превращения, структура (атомная, магнитная, дефектная) и свойства кристаллов, неупорядоченных и композиционных микро- и наносистем при нормальном и высоком давлении» (промежуточный)

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук

В.Е. Антонов

г. Черноголовка  
2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



В.Е.Антонов (Введение,  
8.4.9, заключение)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



А.С.Аронин (8.4.1)

Уч. секретарь, д.ф.-м.н.



Г.Е.Абросимова (8.4.1, 8.4.3)

Зав. сектором, к.ф.-м.н



С.С.Хасанов (8.4.6, 8.4.7)

### Исполнители:

Гл. н.с., д.ф.-м.н.



Э.В.Суворов (8.4.4).

в.н.с., д.ф.-м.н



И.М.Шмытько (8.4.2)

в.н.с., д.ф.-м.н



В.Д.Седых (8.4.3)

в.н.с., д.ф.-м.н



С.З.Шмурак (8.4.5)

в.н.с., д.ф.-м.н



Р.П.Шибаета (8.4.6)

в.н.с., д.ф.-м.н



В.В.Синицын (8.4.8)

в.н.с., д.ф.-м.н



К.П.Мелетов (8.4.7)

с.н.с., к.ф.-м.н



Д.В.Матвеев (8.4.1)

с. н.с., к.ф.-м.н



И.М.Аристова (8.4.1)

с.н.с. к.ф.-м.н



И.А.Смирнова (8.4.4)

с.н.с. к.ф.-м.н



С.В.Симонов (8.4.7.)

с.н.с. к.ф.-м.н



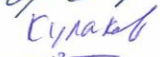
Л.В.Зорина (8.4.7.)

с.н.с. к.ф.-м.н



В.К.Федотов (8.4.9)

с.н.с. к.х.н



В.И.Кулаков (8.4.9)

с.н.с. к.ф.-м.н



В.С.Ефимченко (8.4.9)

н.с., к.ф.-м.н



А.П.Киселев (8.4.5)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 16 страниц, 28 источников

*Ключевые слова:* НАНОСТРУКТУРА, АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ, МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КРИСТАЛЛЫ, МАНГАНИТЫ, ОРТОБОРАТЫ, ОРГАНИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ, ГИДРИДЫ, СТРУКТУРА, ДИФРАКЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ

*Объектом исследования* в рамках направления 8.4 «Фазовые превращения, структура (атомная, магнитная, дефектная) и свойства кристаллов, неупорядоченных и композиционных микро- и наносистем при нормальном и высоком давлении» являются нанокристаллические металлические и оксидные материалы, манганиты и ортобораты редкоземельных металлов, органические проводники, гидриды, молекулярные кристаллы и кристаллы ионных комплексов.

*Цель работы* состоит в экспериментальном исследовании атомной и кристаллической структуры веществ с необычными свойствами, установлением связи между их структурой и свойствами.

*Результаты работы:*

Разработаны принципы управления наноструктурой, образующейся при кристаллизации легких аморфных сплавов под действием температуры и деформации. В аморфно-нанокристаллических образцах Al-Ni-Gd получены близкие к рекордным (1.6 ГПа) для легких сплавов значения прочности. Получены важные результаты по влиянию макроскопических упругих полей на формирование дифракционного изображения дефектов в методах на просвет (геометрия Лауэ) и в методах на отражение (геометрия Брегга). Методами термобарической закалки и “in situ” рентгеновской дифракции в алмазных наковальнях изучены фазовые превращения в кристалле  $\text{NaVO}_4$  при давлениях до 10 ГПа. Показано, что в отличие от молибдатов РЗМ, ванадат  $\text{NaVO}_3$  при давлениях до 10 ГПа не аморфизуется. Выполнены

низкотемпературные рентгеноструктурные исследования кристаллов новых функциональных молекулярных и ион-радикальных комплексов. Проведен анализ деталей организации структур, характера взаимодействий между составляющими, определены зарядовые и спиновые состояния, установлены корреляции структура - свойства.

*Область применения:* Полученные в 2015 году результаты представляют интерес для физики конденсированного состояния и физического материаловедения, а также для разработки новых материалов и структур.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Основная часть.....	9
8.4.1 Нанокристаллические металлические материалы.....	9
8.4.2 Нанокристаллические оксидные материалы .....	9
8.4.3 Структура манганитов лантана .....	9
8.4.4 Рентгеновская оптика кристаллов с дефектами.....	10
8.4.5 Исследование люминесценции ортоборатов редкоземельных Металлов.....	10
8.4.6 Исследование кристаллов новых органических проводников.....	11
8.4.7 Исследование новых функциональных молекулярных комплексов.....	11
8.4.8 Фазовые превращения ванадатов при высоких давлениях.....	11
8.4.9 Исследование гидридов при высоком давлении.....	12
Заключение.....	13
Список использованных источников.....	14

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
РЗМ	Редкоземельные металлы
BEDT-TTF	бис(этилендитио)тетратиафульвален
BCP	бициклопентановый
ИК	инфракрасный
ГПУ	гексагональная плотно упакованная
ГЦК	гранеццентрированная кубическая

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме № 8.4 «Фазовые превращения, структура (атомная, магнитная, дефектная) и свойства кристаллов, неупорядоченных и композиционных микро- и наносистем при нормальном и высоком давлении» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 г.г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Структура и фазовые превращения в твердых телах исследовались при атмосферном и повышенном давлении, превращения изучались в широкой области температур на группе материалов. Исследовались аморфные и нанокристаллические материалы, гидриды высокого давления, органические проводники. Нанокристаллические материалы обладают рядом физических свойств, значительно превышающим соответствующие значения и аморфных, и традиционных кристаллических материалов. Создание таких материалов определяется особенностями фазовых превращений при кристаллизации аморфной фазы и параметрами сформированной структуры.

Органические проводники проявляют поведение, характерное для сильно коррелированных электронных систем; в случае сверхпроводников, например, обнаруживается много общего с высокотемпературными слоистыми сверхпроводниками. Химический синтез кристаллов часто приводит к менее дефектным структурам, чем в случае выращивания неорганических кристаллов, вследствие чего органические кристаллы могут стать модельными объектами при решении релевантных физических задач. С

другой стороны молекулярные кристаллы, кристаллы ионных комплексов, предоставляют возможность исследовать совершенно новые физические явления, которые отсутствуют в традиционной физике твердого тела. Основным направлением исследований является установление причин формирования тех или иных структуры, установление корреляции структурных свойств, выяснение причин формирования структур разного типа и определяемых ими физических свойств

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

Научный коллектив исполнителей НИР оснащен всем необходимым технологическим оборудованием для синтеза изучаемых материалов и изготовления образцов, и современными высокоточными измерительными приборами и комплексами для их исследования.



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *8.4.1 Нанокристаллические металлические материалы*

Разработаны принципы управления наноструктурой, образующейся при кристаллизации легких аморфных сплавов под действием температуры и деформации. Определены условия, обеспечивающие максимальное количество потенциальных мест зарождения нанокристаллов и формирование наноструктуры с оптимальными размерами нанокристаллов и долей нанокристаллической фазы, приводящие к повышению прочностных свойств. При деформационной и комбинированной термо-механической обработке образование нанокристаллов происходит в области полос сдвига. В аморфно-нанокристаллических образцах Al-Ni-Gd получены рекордные для легких сплавов значения прочности 1.6 ГПа.

#### *8.4.2 Нанокристаллические оксидные материалы*

Проведены исследования изменения структуры нанокристаллического порошка титаната бария  $\text{BaTiO}_3$  после его прессования в таблетки и последующих высокотемпературных отжигов. Показано, что начиная с температур 1100-1200 °С отжиг полученных таблеток приводит к образованию в них значительной доли (~30-40%) фазы  $\text{Ba}_2\text{TiO}_4$ . Обнаружено, что эта фаза исчезает при понижении температуры. Фаза не наблюдается в некомпактированных порошковых образцах. Полученные результаты указывают на существенное влияние межкристаллитных границ на фазовые превращения в нанокристаллических системах.

#### *8.4.3 Структура манганитов лантана*

На основании полученных экспериментальных данных по структурным изменениям в манганитах лантана, легированных двухвалентными элементами (Ca, Sr, Ba) с разной концентрацией, предложена модель структурных превращений в легированных манганитах лантана. Модель

предполагает, что существует два конкурирующих фактора, влияющих на структурные превращения. Один связан с орбитальным порядком (электронная подсистема), другой – с появлением не ян-теллеровского иона  $Mn^{4+}$ , который разрушает орбитальный порядок. Изменение ионного радиуса легирующего элемента (изменение типа примеси) приводит к изменению объема ячейки, длины связи Mn-O и угла связи Mn-O-Mn, что, в свою очередь, меняет степень орбитального перекрытия и ведет к изменению (усилению или ослаблению) орбитального порядка.

#### *8.4.4 Рентгеновская оптика кристаллов с дефектами*

Подготовлены образцы для работы с устройствами изгиба (с радиусами от 10 м до нескольких сотен метров) в процессе рентгеновского исследования и проведены предварительные эксперименты. В образцы введены винтовые и 60-градусные дислокации или приповерхностные дефекты «квазиточечного типа». Получены предварительные результаты по влиянию макроскопических упругих полей на формирование дифракционного изображения дефектов в методах на просвет (геометрия Лауэ) и в методах на отражение (геометрия Брегга). Показано, что в геометрии Брегга суперпозиция макроскопических полей кардинальным образом меняет дифракционное изображение дефектов.

#### *8.4.5 Исследование люминесценции ортоборатов редкоземельных металлов*

Исследованы спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции, ИК спектры поглощения и кристаллическая структура ортоборатов  $Lu_{1-x-y}Ce_xTb_yVO_3$ . Показано, что в спектре возбуждения люминесценции ионов  $Tb^{3+}$  доминирует широкая полоса, совпадающая с полосой возбуждения ионов  $Ce^{3+}$ . Спектральное положение этой полосы зависит от структурного состояния образца: ее максимумы в структурах кальцита и ватерита находятся при  $\sim 339$  и  $\sim 367$  нм, соответственно.

Изменение соотношения между фазами кальцита и ватерита позволяет направленно изменять спектр возбуждения свечения Tb<sup>3+</sup> ионов.

#### 8.4.6 Исследование кристаллов новых органических проводников

Проведены рентгеноструктурные исследования при комнатной и низкой температурах новых катион-радикальных солей BEDT-TTF с магнитным металлокомплексным анионом [Re<sup>IV</sup>Cl<sub>6</sub>]<sup>2-</sup>: β-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>[ReCl<sub>6</sub>] (**1**), α'-(BEDT-TTF)<sub>4</sub>[ReCl<sub>6</sub>]·(DCE)<sub>2</sub> (**2**) и δ-(BEDT-TTF)<sub>4</sub>[ReCl<sub>6</sub>]<sub>1.5</sub>·(CB)<sub>0.5</sub> (**3**). Для кристаллов **2** установлено существование структурного фазового перехода при температуре около 175 К, сопровождающегося понижением симметрии с моноклинной до триклинной. Фазовый переход в основном связан с модуляцией смещения аниона [Re<sup>IV</sup>Cl<sub>6</sub>]<sup>2-</sup> относительно среднего положения в исходной структуре.

#### 8.4.7 Исследование новых функциональных молекулярных комплексов

Исследованы структуры монокристаллов трех магнитных комплексов на основе Mn(salpn) и Mn(dapsc) с [M(CN)<sub>5</sub>NO] (M = Fe, Mn). В структурах найдены дискретные полиядерные кластеры, бесконечные цепочки или двумерные сетки, в которых наблюдаются слабые антиферромагнитные взаимодействия. Оптические свойства свидетельствуют о существовании долгоживущих метастабильных состояний в [Fe(CN)<sub>5</sub>NO].

Изучена структура (при 293 и 120 К) монокристаллов нового молекулярного мотора, содержащего два вращающихся бициклопентановых (BCP) фрагмента. Измерения времени протонной спин-решеточной релаксации в интервале температур 35–300 К методом <sup>1</sup>H ЯМР показали, что энергетический барьер вращения BCP ротора в этих кристаллах ниже, чем в аналогичных кристаллах с бициклооктановым ротором.

#### 8.4.8 Фазовые превращения ванадатов при высоких давлениях

Методами термобарической закалки и “in situ” рентгеновской дифракции в алмазных наковальнях изучены фазовые превращения в кристалле  $\text{NaVO}_4$  при давлениях до 10 ГПа. В области давлений 5.6–6.1 ГПа обнаружен переход в новую  $\gamma$ -фазу высокого давления, сопровождавшийся значительным повышением диффузного рассеяния для некоторых рефлексов из-за частичного разупорядочения кислородной подрешетки. В отличие от молибдатов РЗМ, ванадат  $\text{NaVO}_3$  при давлениях до 10 ГПа не аморфизуется.

#### *8.4.9 Исследование гидридов при высоком давлении*

Методом закалки изучены состав по водороду и кристаллическая структура фаз Co-H, образующихся при температуре 600°C и давлениях водорода до 9 ГПа. Обнаружено монотонное возрастание растворимости водорода в ГПУ фазе кобальта вплоть до  $\text{H/Co} = 0.8$  при давлении 9 ГПа. Методом рентгеновской дифракции в алмазных наковальнях показано, что при комнатной температуре и давлении 4.5 ГПа происходит скачкообразный переход ГПУ растворов Co-H в ГЦК гидрид с составом, близким к CoH. Полученные результаты требуют пересмотра фазовой диаграммы системы Co-H.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. В 2015 г. научно-исследовательская деятельность проводилась в соответствии с утвержденными планами. Выполнен комплекс исследований, нацеленных на выявление структурных аспектов в материалах разного типа: металлических сплавах, органических проводниках, молибдатах редкоземельных компонентов, гидридов и др. С этой целью проведены прецизионные исследования структуры и свойств изучаемых материалов при различных температурах и давлениях. Полученные результаты важны как для развития представлений об особенностях формирования структур разного типа и определения корреляции структуры со свойствами, так и для разработки новых материалов и структур.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Эволюция структуры аморфной фазы в металлических стеклах типа «металл-металл» Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015, 9, №2, 27-33
2. Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Двухфазный аморфный сплав системы Al-Ni-Y. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015, №2, 28-33
3. Кедров В.В., И.М. Шмытько журнал: «Структурные и морфологические трансформации нанокристаллов BaTiO<sub>3</sub> в тонких слоях боратных оксидных стекол» Физика твердого тела, 2015, том 57, вып. 2, с. 295-299
4. Кобелев Н.П., Е.Л.Колыванов, В.А.Хоник Упругие модули высших порядков металлического стекла Pd<sub>40</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>10</sub>P<sub>20</sub>. ФТТ, т.57, в.8, с.1457-1461 (2015).
5. Мелетов К.П., Д.В. Конарев, А.О. Толстикова Фазовые переходы и фотоиндуцированные превращения при высоком давлении в молекулярном донорно-акцепторном комплексе фуллерена {Cd(dedtc)<sub>2</sub>}<sub>2</sub>•C<sub>60</sub>. К. П., ЖЭТФ, 2015, 147, №6, pp.1145-1154
6. Першина Е.А., Г.Е. Абросимова, А.С. Аронин, Д.В. Матвеев «Эволюция магнитных свойств аморфного сплава Fe<sub>78</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>9</sub> при деформации и последующей термообработке» - ФТТ, 2015. т. 57, вып. 2, 224-227
7. Рассолов С.Г., Е.А. Свиридова, В.В. Максимов, В.К. Носенко, И.В.Жихарев, Д.В. Матвеев, Е.А. Першина, В.И. Ткач. «Термическая устойчивость, кинетика и механизмы распада нанокompозитных структур в сплавах на основе Al» журнал: Металлофизика и новейшие технологии, т. 37, № 8, 2015, с. 1089—1111.
8. Суворов Э.В., И.А.Смирнова, А.С.Образова Устройство для изгиба кристаллов в процессе рентгеновского эксперимента ПТЭ, 2015, N1, 1-3
9. Суворов Э.В., И.А.Смирнова, Дифракционное изображение дефектов в рентгеновской дифракционной топографии (рентгеновской микроскопии) УФН 2015, 185, 9, 897-915

- 10.Шмурак С.З., В.В. Кедров, А.П. Киселев, Т.Н. Фурсова, И.М. Шмытько журнал: «Спектральные и структурные особенности  $\text{Lu}_{1-x}\text{RE}_x\text{VO}_3$ » Физика Твёрдого Тела, Т.57, № 8, 2015, стр.1558-1569
- 11.Шмурак С.З., В.В. Кедров, А.П. Киселев, И.М. Шмытько «Спектральные характеристики различных структурных модификаций  $\text{Lu}_{1-x}\text{Eu}_x\text{VO}_3$ » ФТТ, 2015, том 57, вып. 1 стр 19 -28.
- 12.Шмытько И.М., Г.Р. Ганеева, А.С.Аронин «Влияние межкристаллитных границ на образование новых структурных состояний в простых редкоземельных оксидах» - ФТТ, 2015, т.57, вып. 1, с. 130-135
- 13.Abrosimova G., A. Aronin, A. Budchenko Amorphous phase decomposition in Al-Ni-RE system alloys – Mater. Letters 139 (2015) 194-196
- 14.Antonov V.E., I.A. Sholin Proving the contact rules for phase regions: Implications to phase diagrams of metal-hydrogen systems Journal of Alloys and Compounds, Volume 645, Supplement 1, 2015, Pages S160-S165
- 15.Degtyareva V.F., N.S. Afonikova “Complex structures in the Au-Cd alloy system: Hume-Rothery mechanism as origin.” Solid State Sci., 2015, 49, 61-67
- 16.Degtyareva V.F. “Crystal structure of gold hydride” J. Alloys Comp., 2015, 645, S128-131
- 17.Drozd V., A. Durygin, S. Saxena, V.E. Antonov, M. Tkacz журнал: “Properties of  $\text{Ti}_3\text{AlH}_6$  and  $\text{Ti}_3\text{AlD}_6$  systems at high pressure studied by synchrotron X-ray diffraction analysis” Journal of Alloys Compounds v. 619, 2015, p. 78–81
- 18.Kaleta J., J. Michel, C. Mézière, S. Simonov, L. Zorina, P. Wzietek, A. Rodríguez-Forteza, E. Canadell, P. Batail Gearing motion in cogwheels pairs of molecular rotors: weak-coupling limit CrystEngComm 17 (2015) 7829 – 7834
- 19.Kohn V.G. and I. A. Smirnova журнал: «A study of X-ray multiple diffraction by means of section topography» Acta Cryst. A71, 2015, стр.519–525
- 20.I. Kolevatov, V. Osinniy, M. Herms, A. Loshachenko, I. Shlyakhov, V. Kveder, O. Vyvenko, “Oxygen-related defects: minority carrier lifetime killers in n-type Czochralski silicon wafers for solar cell application”, Phys. Stat. Sol. (c), 46, 80-83 (2015)

21. Konarev Dmitri V, Alexey V Kuzmin, Sergey I Troyanov, Yoshiaki Nakano, Salavat S Khasanov, Akihiro Otsuka, Hideki Yamochi, Gunzi Saito, Rimma N Lyubovskaya Anionic coordination complexes of C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub> with cyclopentadienyl and pentamethylcyclopentadienyl molybdenum dicarbonyl журнал: «Dalton Transactions», 2015 44, 9672-9681
22. Konarev Dmitri V, Alexey V Kuzmin, Maxim A Faraonov, Manabu Ishikawa, Salavat S Khasanov, Yoshiaki Nakano, Akihiro Otsuka, Hideki Yamochi, Gunzi Saito, Rimma N Lyubovskaya Synthesis, Structures, and Properties of Crystalline Salts with Radical Anions of Metal-Containing and Metal-Free Phthalocyanines журнал: «Chemistry-A European Journal», 2015 21, 1014-1028
23. Kopotkov V.A., V.D. Sasnovskaya, D.V. Korchagin, A.I. Dmitriev, R.B. Morgunov, S.M. Aldoshin, S.V. Simonov, L.V. Zorina, D. Schaniel, T. Woike, E.B. Yagubskii The first photochromic bimetallic assemblies based on Mn(III) and Mn(II) Schiff-base (salpn, dapsc) complexes and pentacyanonitrosylferrate(II) CrystEngComm 17 (2015) 3866 – 3876
24. Kuzmin A.V., S.S. Khasanov, R.P. Shibaeva Pressure and temperature dependence of charge transfer behaviour of the  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> organic conductor Acta Cryst.A71, s331(2015).
25. Kuzovnikov M.A., M. Tkacz High pressure studies of cobalt-hydrogen system by X-ray diffraction J. Alloys Compd. 650 (2015) 884-886
26. Matveeva V.N., V.I. Levashov, O.V. Kononenko, D.V. Matveev, Yu.A. Kasumov, I.I. Khodos, V.T. Volkov. "Hall effect sensors on the basis of carbon material". Materials Letters 158 (2015) 384–387
27. Medvedev S.A., O.I. Barkalov, P. Naumov, T. Palasyuk, J. Evers, T. M. Klapötke, C. Felser журнал: «Phase transitions of cesium azide at pressures up to 30GPa studied using in situ Raman spectroscopy» JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 117, 165901 (2015)
28. Sinitsyn V.V., B.S. Redkin, A.P. Kiselev, S.Z. Shmurak, N.N. Kolesnikov, V.V. Kveder, E.G. Ponyatovsky. "White" phosphor on the basis of Gd<sub>2</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>:Eu,Tb,Tm single crystal. Sol-id State Sciences, 2015, v. 46, p. 80-83.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)

УДК 539.4, 539.5, 53.092

ГР № 01201454599

Инв. № 11214 - 36/2115 - 88

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

» 2016 г.



О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Жаропрочные материалы для новой техники» (промежуточный)

Научный руководитель  
член-корр. РАН

М.И. Карпов

г. Черноголовка  
2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### Ответственные исполнители

Зав. лаб., д.т.н., член-корр. РАН.	М.И. Карпов (Введение, 9.1.1., заключение)
Зав. лаб., д.ф.-м.н.	Б.Б. Страумал (9.1.4)
Зав. лаб., д.т.н.	В.Н. Курлов (9.1.6, 9.1.7)
Зав. лаб. к.т.н.	В.М. Кийко (9.1.5)

### Исполнители:

Г.л.н.с., д.т.н.	С.Т. Милейко (9.1.5)
В.н.с., д.т.н.	Б.А. Гнесин (9.1.2)
с.н.с., к.ф.-м.н.ю	В.П. Коржов (9.1.1)
с.н.с., к.т.н.	В.И. Внуков (9.1.1)
с.н.с., к.т.н.	И.Б. Гнесин (9.1.2)
с.н.с., к.т.н.	А.А. Мазилкин (9.1.4)
с. н.с., к.ф.-м.н	Б.М. Шипиловский (9.1.3)
с.н.с., к.ф.-м.н	В.Г. Сурсаева (9.1.4)
с. н.с., к.т.н	Н.И. Новохатская (9.1.5)
с. н.с., к.ф.-м.н	И.А. Шикунова (9.1.7)
с.н.с. к.т.н	С.Н. Россоленько (9.1.7)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 18 страниц, 23 источника

*Ключевые слова:* ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СИЛИЦИДЫ ВОЛЬФРАМА, КАТАСТРОФА АННИГИЛЯЦИИ, ГРАНИЦЫ ЗЁРЕН

*Объектом исследования* в рамках темы «Жаропрочные материалы для новой техники» являются композиционные материалы на основе систем Nb–Si, Nb–Al, Ti–Al, закаленные из расплава силициды вольфрама, сплавы Al–Zn, W–C–Co, Nd–Fe–B, композиты с волокнами сапфир–гексаалюминат кальция и матрицей из рекристаллизованного молибдена, керамические карбидокремниевые материалы, профилированные кристаллы сапфира, биоморфный карбид кремния.

*Целью работы является* создание фундаментальных основ для дальнейшего развития технологий создания жаропрочных материалов для новой техники

*Результаты работы:*

- были получены данные о фазовых и структурных превращениях в композиционных материалах на основе систем Nb–Si, Nb–Al, Ti–Al и в закаленных из расплава силицидах вольфрама;
- было продолжено аналитическое и численное исследование обнаруженного ранее явления катастрофы аннигиляции, которое развивается в открытой системе, где частицы двух типов диффундируют из объема ограниченной среды и гибнут на ее поверхности. В системах Al–Zn и W–C–Co и в сплавах на основе системы Nd–Fe–B наблюдалось формирование нанометрических тонких зернограницных прослоек псевдонеполного смачивания;

- были продолжены исследования по получению жаропрочных композитов с повышенной трещиностойкостью путем применения волокон на основе сложных оксидов;
- был разработан новый метод сварки керамических карбидокремниевых материалов с металлами и сплавами с использованием переходных градиентных слоев;
- на основе профилированных кристаллов сапфира были разработаны новые крионаконечники для совмещения криодеструкции с другими методами воздействия на биологические ткани.

### *Область применения*

Полученные в ходе выполнения НИР в 2015 году фундаментальные результаты будут использоваться в машиностроении, авиационном двигателестроении, авиастроении, создании постоянных магнитов для широкого спектра применений, развитии новых твердых сплавов для строительной техники, глубокого бурения на нефть и газ, металлообработки, создания новых методов для хирургии и медицинской диагностики.

Указанные области применения объясняют высокую экономическую эффективность и значимость проведенных работ, поскольку, несмотря на весьма скромные объёмы финансирования, полученные фундаментальные результаты станут основой прорывных технологий в целом ряде областей современной техники.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
Основная часть.....	9
Важнейшие результаты исследований.....	9
9.1.1. Фазовые и структурные превращения в композиционных Материалах.....	9
9.1.2. Превращения в закаленных из расплава силицидах вольфрама...	9
9.1.3. Аналитическое и численное исследование катастрофы аннигиляции.....	10
9.1.4. Зернограничные прослойки псевдонеполного смачивания.....	10
9.1.5. Жаропрочные композиты с повышенной трещиностойкостью.....	11
9.1.6. Переходные градиентные слои композитов.....	11
9.1.7. Сапфировые наконечники для криодеструкции.....	12
Заключение.....	14
Список источников.....	16

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
-----	---------------------------------

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Жаропрочные материалы для новой техники» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

В настоящее время жаропрочные материалы используются в различных отраслях новой техники, от авиационного двигателестроения до бурильной техники. Требования к их жаростойкости, трещиностойкости, термической стабильности, сроку бездефектной эксплуатации и др. постоянно повышаются и остаются актуальными. Это обстоятельство, в свою очередь, требует постоянных исследований по их развитию. В особенности важны фундаментальные исследования, которые обеспечат задел в развитии жаропрочных материалов вперед на десятилетия. Работы 2015 г. основаны на достигнутом в ИФТТ РАН за 50 лет существования техническом заделе, квалификации исследователей, полученных патентах, и существующем уникальном оборудовании, частично разработанном в стенах института. Большинство полученных в работе результатов являются принципиально новыми. Исследования в рамках данной темы тесно связаны с работами по другим темам плана ИФТТ РАН.

В 2015 г. исследования в рамках темы «Жаропрочные материалы для новой техники» в ИФТТ РАН проводились в семи главных направлениях. В

частности, изучались фазовые и структурные превращения в композиционных материалах на основе систем Nb–Si, Nb–Al, Ti–Al и в закаленных из расплава силицидах вольфрама. Было продолжено аналитическое и численное исследование обнаруженного ранее явления катастрофы аннигиляции, которое развивается в открытой системе, где частицы двух типов диффундируют из объема ограниченной среды и гибнут на ее поверхности. В системах Al–Zn и W–C–Co и в сплавах на основе системы Nd–Fe–B наблюдалось формирование нанометрических тонких зернограницных прослоек псевдонеполного смачивания. Продолжены исследования по получению жаропрочных композитов с повышенной трещиностойкостью путем применения волокон на основе сложных оксидов. Разработан новый метод сварки керамических карбидокремниевых материалов с металлами и сплавами с использованием переходных градиентных слоев. На основе профилированных кристаллов сапфира разработаны новые крионаконечники для совмещения криодеструкции с другими методами воздействия на биологические ткани.

#### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В исследованиях использовались современные методы создания высокотемпературных композиционных материалов (такие как выращивание из расплава, спекание, сварка керамических карбидокремниевых материалов с металлами и сплавами с использованием переходных градиентных слоев). Фазовые и структурные превращения изучались с помощью рентгеноструктурного анализа, рентгеновской дифрактометрии, обычной и высокоразрешающей просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа, дифференциального термического анализа, оптической микроскопии, прецизионного измерения прочности и трещиностойкости



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *9.1.1 Фазовые и структурные превращения в композиционных материалах*

Исследованы фазовые и структурные превращения в композиционных материалах на основе систем Nb–Si, Nb–Al, Ti–Al. В образцах эвтектических сплавов на основе системы Nb–Nb<sub>3</sub>Si обнаружена корреляционная зависимость пределов прочности при испытаниях на растяжение и на изгиб. На образцах многослойных композитов Nb–Al и Ti–Al выявлены механизмы формирования слоев интерметаллидов при высокотемпературных диффузионных отжигах.

#### *9.1.2 Превращения в закаленных из расплава силицидах вольфрама*

Методами рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроанализа проведено экспериментальное исследование превращений в закаленных из расплава силицидах вольфрама, подвергнутых легированию углеродом. Показано, что легированные углеродом эвтектические сплавы силицидов вольфрама в результате закалки обладают структурой, образованной преимущественно фазами W<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + WSi<sub>2</sub>, при концентрации углерода, по крайней мере, до 0,20 мас.%. В результате дальнейшего высокотемпературного отжига таких сплавов, наблюдается выделение частиц SiC внутри фазы W<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. При концентрации углерода 0,69 мас.% и более, частицы SiC присутствуют в структуре сплава уже в результате закалки, до отжига. При закалке легированного углеродом расплава W<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> в структуре сплава возникают дополнительные фазы WSi<sub>2</sub> и W<sub>2</sub>C. Однако после высокотемпературного отжига объемные доли фаз WSi<sub>2</sub> и W<sub>2</sub>C снижаются, наблюдается выделение фазы WC. При закалке из расплава, и при закалке из расплава и последующем отжиге силицидов вольфрама, легированных

углеродом, при значительной объемной доле  $WSi_2$  в исходной шихте образуется карбид кремния. Однако при отсутствии или при относительно небольшом содержании  $WSi_2$  в исходной шихте образуются только карбиды вольфрама, карбид кремния в сплавах отсутствует.

#### *9.1.3 Аналитическое и численное исследование катастрофы аннигиляции*

Продолжено аналитическое и численное исследование обнаруженного ранее явления катастрофы аннигиляции, которое развивается в открытой системе, где частицы А и В диффундируют из объема ограниченной среды и гибнут на ее поверхности (десорбируются) по реакции  $A+B \rightarrow 0$ . В 2015г рассмотрено поведение системы при сильной разнице подвижностей частиц и выявлена богатая общая картина развития катастрофы для произвольного соотношения характерных временных масштабов концентрационного взрыва и диффузии быстрых частиц. Впервые даны детальное аналитическое описание и численная демонстрация эффекта срыва потока, который наблюдается в пределе однородного распределения быстрых частиц. Обнаружено универсальное скейлинговое поведение развития катастрофы в пределе возникновения сильного градиента распределения быстрых частиц. В качестве ударных результатов выявлены замечательные скейлинговые свойства эволюции катастрофы при кроссовере между двумя предельными режимами с радикально различающейся динамикой.

#### *9.1.4 Зернограничные прослойки псевдонеполного смачивания*

Наблюдалось формирование нанометрических тонких зернограничных прослоек псевдонеполного смачивания в системах Al–Zn и W–C–Co и в сплавах на основе системы Nd–Fe–B. С помощью зернограничных прослоек полного смачивания удалось впервые наблюдать образование неравновесных границы зерен при пластической деформации. Предложен новый метод

определения важной термодинамической величины границ зерен – абсолютного значения избытка свободного объёма. Оно было определено экспериментально для границ наклона по зависимости контактного угла в тройном стыке от давления и равно  $5.03 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{м}^2$ . Оно было выведено из соотношения, связывающего его с инкубационным временем для роста зёрен в нанокристаллических тонких плёнках.

#### *9.1.5 Жаропрочные композиты с повышенной трещиностойкостью*

Работа была сосредоточена на предложенном в лаборатории армированных систем новом перспективном направлении в получении жаропрочных композитов с повышенной трещиностойкостью за счет применения композитных волокон на основе сложных оксидов, главной целью которого является разработка принципов построения ультравысокотемпературных – до  $1600^\circ\text{C}$  – квазипластичных материалов с матрицей на основе хрупких компонентов (керамических, интерметаллидных, иных). Результаты испытаний модельных композитов с волокнами сапфир–гексаалюминат кальция и матрицей из рекристаллизованного молибдена показывают, что величины трещиностойкости –  $20\text{-}30 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  – и критических коэффициентов интенсивности напряжений - приближаются к соответствующим величинам для высокопрочных металлических сплавов. Показано, что образцы с соответствующим образом организованной структурой, основанной на изучении и оптимизации микроструктуры, выборе технологических режимов и результатах испытаний, могут быть практически нечувствительны к надрезам: отношения прочности образцов с надрезами к прочности образцов без надрезов достигают значений, близких к единице.

#### *9.1.6 Переходные градиентные слои композитов*

Разработан новый метод сварки керамических карбидокремниевых

материалов с металлами и сплавами с использованием переходных градиентных слоев композита на основе биоморфного карбида кремния, каналы которого заполнены металлом или металлическим сплавом. Основная идея состоит в том, что за счет равномерно изменяемой плотности биоморфного композита фазовый состав и коэффициент термического расширения между керамикой и металлическим сплавом переходного слоя будет изменяться от значений близких к чистому карбиду кремния до значений близких к металлическому сплаву, позволяя скомпенсировать разницу между свариваемыми деталями и организовать прочную связь между свариваемыми деталями. Исследованы особенности взаимодействия биоморфных карбидокремниевых матриц с различными металлами и сплавами, разработаны методики формирования биоморфных композитов с металлическим наполнением для конструктивных применений. Измерены коэффициенты термического расширения биоморфных SiC/Me композитов.

На основе разработанного метода получено сварное соединения между горячепрессованным карбидом кремния и сплавом Al(76)-Si(19)-Ti(5). В качестве переходного слоя использовался биоморфная SiC матрица на основе пиролизованной и просилицированной градиентно деформированной древесины с последующим удалением из каналов кремния и заполнением каналов металлическим сплавом. После термоциклирования в зонах сварного контакта переходного биоморфного композита с горячепрессованной SiC керамикой и металлическим сплавом отсутствовали трещины, что свидетельствует о хорошей компенсации разницы коэффициентов термического расширения между сплавом и керамикой и показывает возможность применения предложенной схемы.

#### *9.1.7 Сапфировые наконечники для криодеструкции*

На основе профилированных кристаллов сапфира разработаны новые крионаконечники для совмещения криодеструкции с другими методами

воздействия на биологические ткани, а именно передачи лазерного и других типов оптического излучения для усиления деструктирующего действия и возможности оптической диагностики состояния тканей. По сравнению с традиционно используемыми металлическими наконечниками криодеструкторов сапфировые наконечники интенсивнее отводят тепло от зоны контакта с биологической тканью, что существенно увеличивает скорость охлаждения прилегающей к наконечнику ткани. Выполнение хладопровода деструктора из прозрачного сапфира с протяженным каналом и расположение в канале оптических волокон обеспечивает расширение возможностей метода криодеструкции, позволяющего одновременно или последовательно с криовоздействием проводить лазерное температурное воздействие на объем ткани с пространственным совмещением областей крио- и лазерного воздействия. Прозрачность использованного для изготовления зонда сапфира позволяет не только доставлять лазерное излучение в зону криовоздействия, но и захватывать излучение, отраженное от ткани или переизлученное тканью (флуоресценцию) и проводить предварительную, одновременную или следующую после терапии оптическую диагностику.

Новые криохирургические инструменты обеспечивают больший контроль над ходом операции по криодеструкции, за счет управления температурным распределением, применения оптической диагностики состояния тканей, подвергающихся заморозке, возможности визуализации, повышения эксплуатационных характеристик сапфировых крионаконечников по сравнению с металлическими аналогами. Также сапфировые наконечники могут многократно подвергаться любому типу стерилизации без ухудшения их свойств и формы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы выполнены в соответствии с госзаданием ИФТТ РАН. Ниже приведены краткие выводы по результатам выполнения НИР. Проведенные комплексные исследования выявили закономерности фазовых и структурных превращения в композиционных материалах на основе систем Nb–Si, Nb–Al, Ti–Al и в закаленных из расплава силицидах вольфрама. Было продолжено аналитическое и численное исследование обнаруженного ранее явления катастрофы аннигиляции, которое развивается в открытой системе, где частицы двух типов диффундируют из объема ограниченной среды и гибнут на ее поверхности. В системах Al–Zn и W–C–Co и в сплавах на основе системы Nd–Fe–B наблюдалось формирование нанометрических тонких зернограницных прослоек псевдонеполного смачивания. Продолжены исследования по получению жаропрочных композитов с повышенной трещиностойкостью путем применения волокон на основе сложных оксидов. Разработан новый метод сварки керамических карбидокремниевых материалов с металлами и сплавами с использованием переходных градиентных слоев. На основе профилированных кристаллов сапфира разработаны новые крионаконечники для совмещения криодеструкции с другими методами воздействия на биологические ткани.

Задачи, поставленные в госзадании ИФТТ РАН, полностью решены. Полученные результаты находятся на мировом уровне или даже его несколько опережают. Об этом свидетельствует участие в исследованиях партнеров из ведущих зарубежных научных учреждений, обнародование результатов на интернациональных научных конференциях и публикация полученных данных в ведущих международных журналах. Полученные фундаментальные результаты найдут своё применение в машиностроении, авиационном двигателестроении, авиастроении, создании постоянных

магнитов для широкого спектра применений, развитию новых твердых сплавов для строительной техники, глубокого бурения на нефть и газ, металлообработки, создания новых методов для хирургии и медицинской диагностики. Указанные области применения объясняют высокую экономическую эффективность и значимость проведенных работ, поскольку, несмотря на весьма скромные объёмы финансирования, полученные фундаментальные результаты станут основой прорывных технологий в целом ряде областей современной техники. Важность полученных результатов обуславливает весьма положительный прогноз для продолжения указанных исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гнесин Б.А., Гнесин И.Б. Синтез фазы Новотного  $\text{Mo}_{4.8}\text{Si}_3\text{C}_{0.6}$  из смесей  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  с углеродом. Неорганические материалы, 2015, т.51, №10, стр. 1073-1080.
- 2 Гнесин И.Б., Гнесин Б.А. Фазовый состав закаленных из расплава силицидов вольфрама, легированных углеродом, Материаловедение, 2015 выпуск 11, стр. 28-34
- 3 Коржов В.П., В.М. Кийко «Структура и механические свойства слоистых композитов  $\text{Ni}/\text{Al}$  с упрочнением интерметаллидами». Деформация и разрушение материалов, №6, 2015, с. 6-11
- 4 Милейко С.Т. «Синергизм в композитах, Композиты и Наноструктуры, 2015, 7, № 4, 195-204
- 5 Россоленко С.Н., Д.О. Стрюков, В.Н. Курлов «Определение уровня расплава из реального весового сигнала в автоматизированном процессе выращивания кристаллов по способу Степанова (EFG) и использование перемещения тигля в качестве управляющего воздействия» ЖТФ, т. 85, №6, 2015, стр. 34-39.
- 6 Россоленко С.Н., Д.О. Стрюков, В.Н. Курлов «Определение реального радиуса кристалла из весового сигнала в процессе выращивания способом Степанова (EFG)» ЖТФ, т. 85, №6, 2015, стр. 87-89.
- 7 Светлов И.Л., Н.А. Кузьмина, А.В. Нейман, И.В. Исходжанова, М.И. Карпов, Т.С. Строганова, В.П. Коржов, В.И. Внуков. «Влияние скорости кристаллизации на микроструктуру, фазовый состав и прочность in-situ композита  $\text{Nb}/\text{Nb}_5\text{Si}_3$ ». Известия РАН. Серия физическая. 2015. №9. стр. 1296–1301.
- 8 Строганова Т.С., Карпов М. И., Коржов В.П., Внуков В.И., Прохоров Д.В., Желтякова И.С., Гнесин И.Б., Светлов И.Л. «Влияние титана и молибдена на структуру и механические свойства in-situ-композита на основе системы ниобий-кремний», Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015, т. 79, № 9, стр. 1300-1304.
- 9 Сурсаева В. Г. Особенности роста зёрен в плёнках серебра. Известия РАН серия физическая, 2015, том 79, № 9, с. 1276–1280



- 10 Сурсаева В.Г., Горнакова А.С. Причины отклонения от параболического закона роста зерен в пленках серебра // Деформация и разрушение материалов. (2015). № 11. С. 6-9.
- 11 Фирстов С.А., М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Т.С. Строганова Журнал: «Структура и свойства слоистого композита из высокоэнтропийного сплава с карбидным и интерметаллическим упрочнением». Известия РАН. Серия физическая, т. 79, №9, 2015, с. 12671275
- 12 Bobruk E.V., X. Sauvage, N.A. Enikeev, B.B. Straumal, R.Z. Valiev, Mechanical behavior of ultra-fine grained Al–5Zn, Al–10Zn, Al–30Zn alloys. Rev. Adv. Mater. Sci. 43 (2015) 45–51
- 13 Gottstein Günter, Lasar Shvindlerman, Thermodynamics and Kinetics of 1DStructural Elements and Stability of Nanocrystalline Materials, Diffusiion Foundations Vol 5 (2015)173-195
- 14 Karpov M.I., Valery P. Korzhov, Dmitry V. Prokhorov, Irina S. Zheltyakova, Tatiana S. Stroganov, Victor I. Vnukov Журнал: «Preparation, structure and high temperature properties of layered Nb/Al- and Ti/Al-composites». J. Intern. Scient. Public.: Materials, Methods and Technologies, v. 8, 2014, p. 177185.
- 15 Shipilevsky B.M. Catastrophe in diffusion-controlled annihilation dynamics: general scaling properties Журнал: Eur. Phys. J. B, 88, 11, 302 (2015) (19pp)
- 16 Straumal B.B., V.A. Yardley, B.B. Straumal, A.O. Rodin, Influence of the grain boundary character on the temperature of transition to complete wetting in Cu–In system, J. Mater. Sci. 50 (2015) 4762–4771
- 17 Straumal B.B., O.A. Kogtenkova, R.Z. Valiev, P. Zięba, B. Baretzky Diffusion and phase transitions accelerated by severe plastic deformation. Diffusion Foundations 5 (2015) 95–108
- 18 Straumal B.B., I. Konyashin, B. Ries, A.B. Straumal, A.A. Mazilkin, K.I. Kolesnikova, A.M. Gusak, B. Baretzky pseudopartial wetting of WC/WC grain boundaries in cemented carbides. Mater. Lett. 147 (2015) 105–108
- 19 Straumal B.B., A.R. Kilmametov, Yu. Ivanisenko, A.A. Mazilkin, O.A. Kogtenkova, L. Kurmanaeva, A. Korneva, P. Zięba, B. Baretzky Phase

transitions induced by severe plastic deformation: steady-state and equifinality- *Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.)* 106 (2015) 657–664

- 20 Straumal B.B., A.R. Kilametov, A.A. Mazilkin, L. Kurmanaeva, Y. Ivanisenko, A. Korneva, P. Zięba, B. Baretzky. Transformations of Cu(In) supersaturated solid solutions under high-pressure torsion *Mater. Letters* 138 (2015) 255–258.
- 21 Straumal B.B., A.R. Kilametov, A.A. Mazilkin, S.G. Protasova, K.I. Kolesnikova, P.B. Straumal, B. Baretzky Amorphization of Nd-Fe-B alloy under the action of high-pressure torsion. *Mater. Lett.* 145 (2015) 63–66
- 22 Sursaeva V.G. Peculiarities of Grain Growth in Silver Films *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2015, Vol. 79, No. 9, pp. 1130–1133
- 23 Tietze Th., P. Audehm, Y.C. Chen, G. Schütz, B.B. Straumal, S.G. Protasova, A.A. Mazilkin, P.B. Straumal, Th. Prokscha, H. Luetkens, Z. Salman, A. Suter, B. Baretzky, K. Fink, W. Wenzel, D. Danilov, E. Goering Interfacial dominated ferromagnetism in nanograined ZnO: a  $\mu$ SR and DFT study *Scientific Reports* 5 (2015) 8871

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 538.95, 538.91

ГР № 01201454597

Инв. № 11214-36/2115-89

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

В.В. Кведер

» 2016 г.



**О Т Ч Е Т**

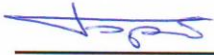






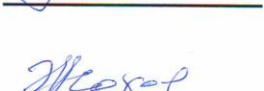
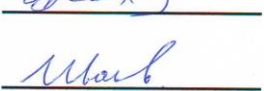
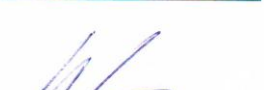
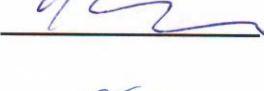



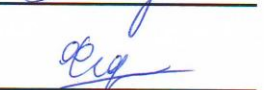
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Новые функциональные материалы для микроэлектроники,  
оптоэлектроники и эффективного преобразования энергии»  
(промежуточный)**

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук

С.И. Бредихин

г. Черноголовка  
2016

# СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель Заведующий лабораторией Доктор физ.-мат. наук, доцент		С.И. Бредихин (Общая редакция, Введение, заключение)
Младший научный сотрудник		Д.А. Агарков (раздел 1.2)
Старший научный сотрудник		Д.Н.Борисенко (раздел 1.1)
Канд. технических наук Старший научный сотрудник		Е.Б.Борисенко (1.1)
Канд. технических наук Старший научный сотрудник		И.Н. Бурмистров (раздел 1.2)
Канд. физ.-мат. наук Младший научный сотрудник		Н.В. Деменева (раздел 1.2)
Заведующий лабораторией Доктор технических наук Старший научный сотрудник		Г.А. Емельченко (раздел 1.3)
Канд. технических наук Младший научный сотрудник		А.А. Жохов (раздел 1.3)
Младший научный сотрудник		А.И. Иванов (раздел 1.2)
Заведующий лабораторией Кандидат технических наук		Н.Н.Колесников (раздел 1.1)
Научный сотрудник		В.А. Колотыгин (раздел 1.2)
Старший научный сотрудник		В.М.Масалов (1.3)
Канд. технических наук Старший научный сотрудник		Д.В. Матвеев (Раздел 1.2)
Канд. физ.-мат. наук, доцент		Ю.С. Федотов (раздел 1.2)
Младший научный сотрудник		Ю.С. Федотов (раздел 1.2)

Заведующий  
лабораторией  
Канд. хим. наук



В.В. Хартон (раздел 1.2)

Инженер-патентовед  
Нормоконтроллер



И.А. Карпова (общее  
оформление)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 16 страниц, 21 источник

*Ключевые слова:* ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, МОНОКРИСТАЛЛЫ, ДИФФУЗИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ ОБМЕН КИСЛОРОДА В СЛОЖНЫХ ОКСИДАХ, МИКРОЧАСТИЦЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.

*Объектом исследования* являются 2D структуры на основе GaSe и GaTe, монокристаллы гелимагнитного соединения  $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ , сложные оксиды  $\text{PrSrCoNi}$  (PSCN), монодисперсные коллоидные частицы  $\text{SiO}_2$ , кристаллы ВТСП, изоструктурных оксидов гомологического ряда  $\text{Eu}_n\text{Ba}_m\text{Cu}_{m+n}\text{O}_y$ .

*Целями работы являются:*

- получение данных о люминесцентных свойствах 2D структур на основе GaSe и GaTe, имеющих толщину до одной элементарной ячейки;
- отработка методики получения монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_x\text{Te}_{3-x}$  и изучение возможности приготовления из них фольг, ориентированных в плоскости (0001);
- исследование диффузии и поверхностного обмена кислорода в сложных оксидах  $\text{PrSrCoNi}$  (PSCN) ;
- синтез микрочастиц  $\text{SiO}_2$  сферической формы размерами от 5 микрон до 50 микрон.

*Результаты работы:*

- получены новые данные о люминесцентных свойствах 2D структур на основе GaSe и GaTe, имеющих толщину до одной элементарной ячейки;
- исследована оптическая стабильность 2D структур на основе GaSe и GaTe, перспективных для создания новых светоизлучающих приборов видимого диапазона спектра;
- с помощью метода вторичной ионной масс спектрометрии в диапазоне температур 600–850°C с шагом 50°C исследованы диффузия и поверхностный обмен кислорода в сложных оксидах  $\text{PrSrCoNi}$  (PSCN);

- синтезированы микрочастицы сферической формы размерами от 5 микрон до 50 микрон перспективные для применения в фотонике, в биологических и химических сенсорах, в катализе, фармакологии и др;
- исследован фазовый состав образцов  $\text{Eu}_{0.01-0.03}\text{Ba}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}_y$  ( $x$  от 0,03 до 0,41), отожженных на воздухе при температуре 915-1100°C, методами рентгенофазового и химического анализов, электронной дифракции и элементного анализа в просвечивающем электронном микроскопе.

#### *Область применения*

В ходе выполнения НИР в 2015 году получены результаты перспективные для разработки энергетических установок на твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ), при разработке нового типа биологических и химических сенсоров, при создании новых катализаторов.

В ходе выполнения НИР в 2015 году получено Решение от Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) о выдаче следующих патентов:

1. Каракулина О.М., Истомин С.Я., Казаков С.М., Розова М.Г., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Антипов Е.В. «Катодные материалы для ТОТЭ на основе никельсодержащих слоистых перовскитоподобных оксидов» Патент на изобретение №2553460, опубликовано 20.06.2015.
2. Бредихин С.И., Агарков Д.А., Бурмистров И.Н., Деменева Н.В., Матвеев Д.В., Федотов Ю.С., Хартон В.В. «Батарея ТОТЭ планарной геометрии» Патент на полезную модель №157575, дата приоритета 05.05.2015, опубликовано 10.12.2015.
3. 4.3 Деменева Н.В., Матвеев Д.В., Бредихин С.И., Иванов А.И., Хартон В.В. «Способ изготовления контактного электродного материала с контролируемой пористостью для батарей твердооксидных топливных элементов» Патент на изобретение, №2568815 решение о выдаче Патента 22.09.2015, опубликовано 20.11.2015.
4. Редькин Б.С., Сеницын В.В., Колесников Н.Н. Люминесцентное литий-боратное стекло. Патент РФ на изобретение № 2544940, опубликовано 20.03.2015.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
Основная часть.....	10
Процесс теоретических и экспериментальных исследований.....	10
1.1 Получение монокристаллов селенида и теллурида галлия и висмута.....	10
1.2 Исследование диффузии и поверхностного обмена кислорода в сложных оксидах.....	10
1.3 Синтез микрочастиц $\text{SiO}_2$ сферической формы размерами от 5 микрон до 50 микрон.....	11
1.4 Исследование фазового состава новых оксидов состава $\text{Eu}_{0.01-0.03}\text{Ba}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ .....	11
Заключение.....	13
Список использованных источников.....	14



## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
ВТСП	Высокотемпературные сверхпроводники
ТОТЭ	твёрдооксидный топливный элемент
РЦКП ИФТТ РАН	Распределенный центр коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твёрдого тела Российской академии наук
ФГУП «ВНИИМС»	Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы

## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме № 9.2 Новые функциональные материалы для микроэлектроники, оптоэлектроники и эффективного преобразования энергии является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Рост энергопотребления, обусловленный развитием цивилизации, проблема истощаемости ископаемых энергоносителей, возрастание их стоимости и близкая к предельной экологическая нагрузка побуждает человечество предпринимать усилия по повышению эффективности преобразования энергии первичных источников в электрическую энергию и развивать альтернативные способы ее производства. Развитие современной энергетики невозможно, без создания новых функциональных материалов и структур для микроэлектроники, оптоэлектроники и эффективного преобразования энергии.

Актуальность выполнения НИР обусловлена необходимостью быстрого развития технологий, обеспечения высокой надежности и эффективности новых устройств для эффективного преобразования энергии, получения научных и технологических результатов, способных к правовой охране, и решения инновационных научно-исследовательских и технологических задач, предусматривающих последующую реализацию полученных научных результатов.

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

Научный коллектив исполнителей НИР оснащен современными высокоточными измерительными приборами и комплексами, а также

технологическим оборудованием, позволяющим синтезировать и проводить аттестацию новых функциональных материалов, создавать на их основе модельные образцы и производить их исследования во всем спектре условий, необходимых для дальнейшего практического применения.

Научный коллектив исполнителей при выполнении НИР будет использовать уникальные научные стенды и установки Распределенного центра коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук (РЦКП ИФТТ РАН).

Все основные методики РЦКП ИФТТ РАН, используемые для исследований структуры, фазового и химического состава, а также характеристики создаваемых структур, аттестованы и внесены в Федеральный реестр Методик выполнения измерений в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ФГУП «ВНИИМС»).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Процесс теоретических и экспериментальных исследований

#### *1.1 Получение монокристаллов селенида и теллурида галлия и висмута*

Получены новые данные о люминесцентных свойствах 2D структур на основе GaSe и GaTe, имеющих толщину до одной элементарной ячейки; исследована оптическая стабильность этих материалов, перспективных для создания новых светоизлучающих приборов видимого диапазона спектра.

Предложены методики получения монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_x\text{Te}_{3-x}$  и показана возможность приготовления из них фольг, ориентированных в плоскости (0001). Изготовленные тонкие структуры пригодны, в частности, для изучения поверхностных состояний в этих материалах, перспективных в качестве топологических изоляторов. Предложена новая методика газотранспортного получения монокристаллов гелимагнитного соединения  $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ , исследованы особенности ферромагнитного перехода в тонких монокристаллических пластинках при атмосферном и высоком ( $> 4$  ГПа) давлениях.

#### *1.2 Исследование диффузии и поверхностного обмена кислорода в сложных оксидах*

Исследованы диффузия и поверхностный обмен кислорода в сложных оксидах  $\text{PrSrCoNi}$  (PSCN) с помощью метода вторичной ионной масс-спектрометрии в диапазоне температур 600–850°C с шагом 50°C. Получены значения объёмного коэффициента диффузии кислорода и усреднённой константы поверхностного обмена кислорода в PSCN в диапазоне температур 600–850°C с шагом 50°C.

Зависимости объёмного коэффициента диффузии кислорода и усреднённой константы поверхностного обмена кислорода в PSCN от температуры в координатах Аррениуса в диапазоне температур 600–850°C хорошо ложатся на прямые с наклонами 0,89 эВ и 0,83 эВ, соответственно. Различие между экспериментальными профилями диффузии и

аппроксимирующими теоретическими кривыми обусловлено заметным вкладом диффузии кислорода по границам зёрен в керамическом материале при размере зёрен порядка 1 мкм и менее.

### *1.3 Синтез микрочастиц SiO<sub>2</sub> сферической формы размерами от 5 микрон до 50 микрон*

Синтезированы микрочастицы сферической формы размерами от 5 микрон до 50 микрон, сформированные монодисперсными коллоидными частицами SiO<sub>2</sub> путем их плотнейшей упаковки в гранецентрированную кубическую решетку, аналогично опалоподобным структурам. Синтез проводили методом распыления – сушки водной суспензии коллоидных частиц диоксида кремния в воздухе без использования сурфактантов при комнатной температуре. Такие частицы с контролируемыми размерами и заданной системой пор, специальной структурой и морфологией, перспективны для применения в фотонике, в биологических и химических сенсорах, в катализе, фармакологии и др.

Выращены кристаллы ВТСП: Bi<sub>2</sub>Sr<sub>1.3</sub>La<sub>0.7</sub>CuO<sub>6+δ</sub> (T<sub>c</sub> = 19 K), Bi<sub>2</sub>Sr<sub>1.25</sub>La<sub>0.75</sub>CuO<sub>6+δ</sub> (T<sub>c</sub> = 12 K) и Bi<sub>1.4</sub>Pb<sub>0.6</sub>Sr<sub>1.3</sub>La<sub>0.7</sub>CuO<sub>6+δ</sub> (T<sub>c</sub> = 25 K). Проводятся исследования их физических свойств.

### *1.4 Исследование фазового состава новых оксидов состава Eu<sub>0.01-0.03</sub>Ba<sub>x</sub>Cu<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub>*

Исследован фазовый состав образцов Eu<sub>0.01-0.03</sub>Ba<sub>x</sub>Cu<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> (x от 0,03 до 0,41), отожженных на воздухе при температуре 915-1100°C, методами рентгенофазового и химического анализов, электронной дифракции и элементного анализа в просвечивающем электронном микроскопе. Выявлено значительное отклонение катионного состава частиц с дифракцией фазы 123 от номинального, что предполагает существование изоструктурных оксидов гомологического ряда Eu<sub>n</sub>Ba<sub>m</sub>Cu<sub>m+n</sub>O<sub>y</sub>, включающего оксиды с матричными составами (Ba:Cu) 4:7, 5:8 и 3:5, а также 2:3, 5:7, 3:4, 4:5 и 5:6.

Неоднородность исследуемых образцов обусловлена присутствием фаз разного катионного состава гомологического ряда  $\text{Eu}_n\text{Ba}_m\text{Cu}_{m+n}\text{O}_y$ , когерентно сращенных друг с другом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все пункты плана НИР ИФТТ РАН по теме № 9.2 Новые функциональные материалы для микроэлектроники, оптоэлектроники и эффективного преобразования энергии на 2015 год выполнены полностью. В 2015 году получены следующие результаты:

1. Получены новые данные о люминесцентных свойствах 2D структур на основе GaSe и GaTe, имеющих толщину до одной элементарной ячейки и исследована их оптическая стабильность.
2. Показано, что 2D структуры на основе GaSe и GaTe являются перспективными материалами для создания новых светоизлучающих приборов видимого диапазона спектра.
3. С помощью метода вторичной ионной масс спектрии в диапазоне температур 600–850°C с шагом 50°C исследованы диффузия и поверхностный обмен кислорода в сложных оксидах PrSrCoNi (PSCN). Показано, что новые сложные оксиды являются перспективными материалами для использования их в качестве катодов твердооксидных топливных элементов.
4. Синтезированы микрочастицы сферической формы размерами от 5 микрон до 50 микрон, сформированные монодисперсными коллоидными частицами SiO<sub>2</sub> путем их плотнейшей упаковки в гранецентрированную кубическую решетку. Показано, что микрочастицы сферической формы размерами от 5 микрон до 50 микрон будут использованы при разработке нового типа биологических и химических сенсоров, при создании новых катализаторов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Барковский Н.В. Органические реагенты для идентификации Bi(V) и O в оксидах Ba-Bi-O и K-Ba-Bi-O тест-методами [Текст]// Журнал аналитической химии. — 2015. — Т.70. — № 11. — С.1171-1178.
- 2 Баулин В.Е. Кислотные фосфорилподанды как компоненты сорбентов импрегнированного типа для выделения 99Mo из азотнокислых растворов [Текст] / Баулин В.Е., О.В. Коваленко, А.Н. Туранов, В.К. Карандашев, А.Н. Усолкин, Н.Г. Яковлев, Ю.А. Ворошилов, А.Ю. Цивадзе // Радиохимия. — 2015. — Т. 57. — № 1. — С. 53-59.
- 3 Г.А. Емельченко Особенности структуры нанокристаллов ZnO, выращенных в порах сферических матриц Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[Текст] / Дулина Н.А., Ю.В. Ермолаева, В.Н. Баумер, А.В. Толмачев, Е.А. Кудренко, Г.А. Емельченко // Кристаллография. — 2015. — Т. 60. — № 2. — С. 322–327.
- 4 Клинова Л.А. Первичное поле кристаллизации оксида EuBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+δ</sub> и существование гомологического ряда EumBamCum+nOy (m=2, 3, 4, 5; n=1, 2) [Текст] / Клинова Л.А., Николайчик В.И., Барковский Н.В., Федотов В.К. // Журнал неорганической химии. — 2015. — Т.60. — № 3.— С.324-332
- 5 Масалов В.М. Выращивание монокристаллов сульфата никеля гексагидрата α-NiSO<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O в стационарных условиях перепада температур [Текст] / Масалов В.М., А.А. Жохов, В.Л. Маноменова, Е.Б. Руднева, А.Э. Волошин, Г.А. Емельченко // Кристаллография. — 2015. — Т. 60 — № 6. — С. 981–98.
- 6 А.М. Ионов Полимермобилизованные комплексы Rh, формирующиеся in situ: получение и каталитические свойства [Текст] / Помогайло А.Д., К.С. Калинина, Н.Д. Голубева, Г.И. Джардималиева, С.И. Помогайло, Е.И. Кнерельман, С.Г. Протасова, А.М. Ионов // Кинетика и катализ. — 2015. — Т. 56 — № 5. — С. 704–712.
- 7 Туранов А.Н. Экстракция РЗЭ(III) из азотнокислых растворов бис(диарилфосфорилметил)бензолами [Текст] / Туранов А.Н., В.К. Карандашев, В.Е. Баулин, Е.В. Кириллов, С.В. Кириллов, В.Н. Рычков, А.Ю. Цивадзе // Журнал неорганической химии. — 2015. — Т. 60. — № 8. — С. 1117-1123.
- 8 Туранов А.Н. Экстракционные свойства 4,4-бис(дифенилфосфорил)бутан-2-она в азотнокислых средах [Текст] / Туранов А.Н., В.К. Карандашев, Г.В. Бодрин, Е.И. Горюнов, В.К. Брель // Радиохимия. — 2015. — Т. 57. — № 6. — С. 509-513.



- 9 Agarkov D.A. Analysis of Interfacial Processes at the SOFC Electrodes by in-situ Raman Spectroscopy [Текст] / Agarkov D.A., I.N. Burmistrov, F.M. Tsybrov, I.I. Tartakovskii, V.V. Kharton, S.I. Bredikhin, V.V. Kveder // ECS Transactions. — 2015 — Vol. 68. — Iss. 1 — P. 2093-2103.
- 10 S.I. Bredikhin Performance Optimization of Cermet SOFC Anodes: An Evaluation of Nanostructured Ni [Текст] / Burmistrov I.N., D.A. Agarkov, I.I. Tartakovskii, V.V. Kharton, S.I. Bredikhin // ECS Transactions. — 2015. — V. 68.— Iss. 1, P. 1265-1274.
- 11 Demeneva N., D. Interdiffusion and Charge Transport Across Surface-Modified Current Collectors in Planar SOFCs [Текст] / Demeneva N., D. Matveev, V. Kharton, and S. Bredikhin // ECS Transactions. — 2015. — Vol. 68(1). — P 1707-1713/
- 12 N.V. Klassen Control of Functional Characteristics of Biomorphous Carbon Matrices, SiC–Si–C Composites, and SiC–C Ceramics by Prepressing Wood Inorganic Materials [Текст] / Ershov A.E., N.V. Klassen // Applied Research© Pleiades Publishing, Ltd. — 2015. — Vol. 6. — No. 1. — P. 79–90.
- 13 S.G. Protasova Polymer-immobilized rhodium complexes forming in situ: preparation and catalytic properties [Текст] / Pomogailo A.D., K.S. Kalinina , N.D. Golubeva , G.I. Dzhardimalieva , S.I. Pomogailo, E.I. Knerel'man, S.G. Protasova, A.M. Ionov // Kinetics and Catalysis.— September 2015. — V. 56. — Issue 5. — P 694-702.
- 14 V.V. Kharton Oxygen permeability of mixed-conducting  $\text{Ce}_{0.8}\text{Tb}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$  membranes: effects of ceramic microstructure and sintering temperature [Текст] / Ramasamy D., A.L. Shaula, A. Gomez-Herrero, V.V. Kharton, D.P. Fagg // Journal of Membrane Sciences. — 2015. — V. 475. — P. 414-424.
- 15 V.V. Kharton Ion transport in dual-phase  $\text{SrFe}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_{3-\delta}$  ( $x = 0.03 - 0.10$ ): effects of redox cycling [Текст] / Shalaeva E.V., M.V. Patrakeevev, A.A. Markov, A.P. Tyutyunnik, A.M. Murzakaev, V.V. Kharton, E.V. Tsipis, J.C. Waerenborgh, I.A. Leonidov, V.L. Kozhevnikov // Journal of Solid State Electrochemistry. — 2015. Shalaeva E.V., M.V. Patrakeevev, A.A. Markov, A.P. Tyutyunnik, A.M. Murzakaev, V.V. Kharton, E.V. Tsipis, J.C. Waerenborgh, I.A. Leonidov, V.L. Kozhevnikov— V. 19. — P. 841-849.
- 16 Stishov S.M. Quantum degradation of a second-order phase transition[Текст] / Stishov S.M., A. E. Petrova, S. Yu. Gavrilkin, L. A. Klinkova // Phys. Rev. — 2015. —B 91. — 144416

- 17 G.A. Emelchenko. A novel adsorbent for lanthanide adsorption based on tetraoctyldiglycolamide, modified carbon inverse opals [Текст] / Turanov A.N., V.K. Karandashev, N.S. Sukhinina, V.M. Masalov, A.A. Zhokhov, G.A. Emelchenko // RSC Advances. — 2015. — Vol. 5. — P. 529-535.
- 18 Turanov A.N. Extraction of U(VI), Th(IV) and lanthanides(III) from nitric acid solutions CMPO-functionalized ionic liquid in molecular diluents[Текст] / Turanov A.N., V.K. Karandashev, O.I. Artyushin, E.V. Sharova // Solvent Extraction and Ion Exchange. — 2015. — V. 33. — P. 540-553.
- 19 Turanov A.N. Bis(carbamoylmethylphosphine oxide) ligands fixed on the arene core via 1,2,3-triazole linker: novel effective extractants for palladium, lanthanides and actinides in nitric acid media [Текст] / Turanov A.N., V.K. Karandashev, E.V. Sharova, G.K. Genkina, O.I. Artyushin. // RSC Advances. — 2015. — Vol. 5. — P. 27640-27648.
- 20 D.V. Matveev Photonic crystal microspheres [Текст] / Zhokhov A.A., V.M. Masalov, N.S. Sukhinina, D.V. Matveev, P.V. Dolganov, V.K. Dolganov, G.A. Emelchenko // Optical Materials. — 2015. — V. 49, P. 208-212.
- 21 Wimmer E., E. Celasco, L. Vattuone, L. Savio, A. Tejeda, M. Silly, M. D'angelo, F. Sirotti, M. Rocca, A. Catellani, G. Galli, L. Douillard, F. Semond, V.Yu. Aristov, P. Soukiassian. Comment on “Adsorption of hydrogen and hydrocarbon molecules on SiC(001)” by Pollmann et al. [Электронный ресурс] (Surf. Sci. Rep. 69 (2014) 55–104). Журнал: Surf. Sci. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susc.2015.08.025>. (2015).

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФТТ РАН)**

УДК 537.622.4, 537.622.5, 537.622.6

ГР № 01201454600

ИНВ. № 11214-36/2115-90

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИФТТ РАН

член-корр. РАН

**В.В. Кведер**

» 2016 г.

## ОТЧЕТ

## О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**«Нелинейные процессы в нанокompозитных магнитных пленках, жидкокристаллических материалах, на поверхности и в объеме квантовой жидкости» (промежуточный)**

**Научный руководитель**  
**доктор физ.-мат. наук**

**А.А. Левченко**

г. Черноголовка  
2016

## ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ

### Ответственные исполнители

Зам. директора ИФТТ РАН

А.А. Левченко (Введение, 12.1.3,  
12.1.4, 12.1.9, заключение)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

В.С. Горнаков (12.1.7, 12.1.8)

Гл. н.с., д.ф.-м.н..

Л.П. Межов-Деглин (12.1.1,  
12.1.2)

### Исполнители:

В.н.с., д.ф.-м.н.

В.Б. Ефимов (12.1.1, 12.1.2,  
12.1.9)

В.н.с., д.ф.-м.н.

В.К. Долганов (12.1.5)

В.н.с., д.х.н.

А.Н. Туранов (12.1.6)

В.н.с., д.ф.-м.н.

В.И. Никитенко (12.1.7)

В.н.с., д.ф.-м.н.

О.В. Мисочко (12.1.10)

В.н.с., д.ф.-м.н.

Л.С. Успенская (12.1.8)

С.н.с., к.ф.-м.н.

М.Ю. Бражников (12.1.9)

С.н.с., к.ф.-м.н.

П.В. Долганов (12.1.5)

С.н.с., к.ф.-м.н.

Ю.П. Кабанов (12.1.7)

С.н.с., к.ф.-м.н.

О.А. Тихомиров (12.1.7)

## РЕФЕРАТ

Отчет: 18 страниц, 20 источников

*Ключевые слова* ПРИМЕСЬ-ГЕЛИЕВЫЙ ГЕЛЬ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД, КЛАСТЕРЫ, ЭМИССИЯ, СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ, НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ, ХИРАЛЬНОСТЬ, СМЕКТИКИ, ФЕРРОМАГНИТНАЯ ПЛЕНКА, ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ, УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ, ТУРБУЛЕНТНЫЙ КАСКАД, КОГЕРЕНТНЫЕ ФОНОНЫ, ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ФАНО

*Объектом исследования* в рамках направления 12.1 «Нелинейные процессы в нанокompозитных магнитных пленках, жидкокристаллических материалах, на поверхности и в объеме квантовой жидкости» являются нелинейные явления в слабо и сильно нелинейных элетронных, фононных спиновых и волновых системах.

*Целью работы* является понимание механизмов формирования кластеров дефектов, распределений энергии волн и фононов в обратном пространстве, фазовых переходов в неупорядоченных системах атомов и молекул, перемагничивания в тонких пленках.

*Результаты работы:*

- разработана методика исследования диэлектрической проницаемости образцов примесь-гелиевого геля;
- изучены фазовые переходы в спирт-гелиевых гелях и порошках;
- разработан метод изготовления эмиссионных источников зарядов на основе углеродных нанотрубок;
- измерены полевые и температурные зависимости токов положительных и отрицательных зарядов в сильно разупорядоченных образцах твердого гелия;
- экспериментально наблюдаена неустойчивость поверхности сверхтекучего гелия при пропускании теплового потока в объеме жидкости;

- предложен и реализован метод определения плотности фотонных состояний кирального жидкого кристалла с запрещённой фотонной зоной в диапазоне видимых длин волн;
- получены новые сорбционные материалы путем нековалентной модификации многослойных углеродных нанотрубок;
- изучено влияние формы и краев низкоразмерных структурированных магнитных пленок  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (30нм) на процессы их перемагничивания;
- экспериментально исследовано формирование гармоник на частотах ниже частоты накачки в системе капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия в турбулентном режиме при монохроматической накачке;
- проведены экспериментальные исследования когерентной динамики решетки висмута в широком диапазоне температур (от гелиевой до комнатной) при сильном и слабом возбуждении.

#### *Область применения*

Полученные в 2015 году фундаментальные результаты могут быть использованы при конструировании считывающих магнитных устройств, в слаботочной электронике, при повышении быстродействия и надежности жидкокристаллических экранов.

Отчет оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Основная часть.....	8
12.1.1 Диэлектрическая проницаемость гелей.....	8
12.1.2 Фазовые переходы в спирт-гелиевых гелях .....	8
12.1.3 Эмиссионные источники зарядов .....	9
12.1.4 Наблюдение движения зарядов при $T < 0.1\text{ K}$ .....	9
12.1.5 Самоорганизация частиц.....	10
12.1.6 Новые сорбционные материалы.....	10
12.1.7 Перемагничивание низкоразмерных структурированных магнитных пленок.....	11
12.1.8 Моделирование распределения намагниченности в ферромагнитной пленке.....	11
12.1.9. Формирование гармоник в системе капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия.....	12
12.1.10. Когерентная динамика решетки висмута.....	13
Заключение.....	14
Список источников.....	16

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

НИР	Научно-исследовательская работа
SANS	Малоугловое рассеяние нейтронов



## ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР в 2015 году по теме «Нелинейные процессы в нанокompозитных магнитных пленках, жидкокристаллических материалах, на поверхности и в объеме квантовой жидкости» является Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на 2014 - 2016 годы, выполняемый в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г. №2237-р.

### *Современное состояние решаемой научно-технической проблемы*

Нелинейные явления в системах электронов, фотонов и волн играют определяющую роль. Это особенно проявляется в электронных и магнитных устройствах нанометрового размера. Также нелинейность существенна в явлениях на поверхности океанов и в атмосфере. Исследования вышли на новый уровень только в последние два десятилетия в связи с развитием скоростных методов оптической регистрации и продвижением математических методов обработки.

### *Сведения о метрологическом обеспечении НИР*

В настоящем направлении исследований ИФТТ РАН объединены различные группы исследователей, использующие разнообразные современные методы для исследования сильно-коррелированных электронных систем.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Важнейшие результаты исследований

#### *12.1.1 Диэлектрическая проницаемость гелей*

Разработана методика исследования диэлектрической проницаемости образцов примесь-гелиевого геля с молекулами воды в качестве примесей. Основой методики является плоский конденсатор емкостью несколько пикофард, на поверхность которого в сверхтекучем гелии формируется *in situ* толстый слой нанокластеров аморфного льда. Испарение гелия при повышении температуры приводит к распаду примесь-гелиевого геля, образованию порошка нанокластеров льда аморфной фазы. Измерения показали изменение емкости при фазовых превращениях льда. На кривых температурной зависимости емкости при наличии ледяных порошков хорошо видны особенности связанные с фазовыми переходами в твердой фазе льда из кубической в гексагональную фазу. В настоящее время готовятся эксперименты по сравнению диэлектрической восприимчивости льда в массивном и нанокластерном состоянии.

#### *12.1.2 Фазовые переходы в спирт-гелиевых гелях*

Изучены фазовые переходы в спирт-гелиевых гелях и порошках, образующихся после распада гелей при возгонке гелиевых атомов. Оказалось, что при распаде спиртово-гелиевого геля нанокластеры спирта образуют аморфную фазу, что соответствует поведению спирта при быстром охлаждении. Было показано, что температура кристаллизации аморфной фазы этих двух типов образцов – массивных и нанокластерных – существенно различаются. Так в нанокластерных образцах температура фазового перехода на 15 градусов меньше, чем в массивных образцах. В настоящее время проводятся исследования по динамике кристаллизации в массивных и нанокластерных образцов и сравнение полученных результатов с теорией JMAK (Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова). Последние эксперименты

подтвердили существование пластической кубической фазы в спиртовых образцах. Проведены исследования рассеяния нейтронов на примесь-гелиевых образцах. По результатам рассеяния нейтронов SANS были оценены размеры спиртовых кластеров и изучены температурные особенности распада примесь-гелиевых гелей на примере дейтеро-метана, метана, дейтеро-метанола, дейтеро-бензола. Результаты измерений находятся в стадии обработки.

### *12.1.3 Эмиссионные источники зарядов*

Разработан метод изготовления эмиссионных источников зарядов на основе углеродных нанотрубок, пригодных для исследования механизмов движения инжектированных зарядов в образцах твердого тела при температурах ниже 1К. Источники были приготовлены осаждением нанотрубок из разряда на плоскую медную подложку или втиранием нанотрубок в пористый металл. Изучение вольт-амперных характеристик источников, проведенные в сверхтекучем гелии, показали, что при напряжениях выше 120 В можно наблюдать относительно большой ток отрицательных и положительных зарядов на уровне  $10^{-13}$  А.

### *12.1.4 Наблюдение движения зарядов при $T < 0.1$ К*

В образцах твердого гелия, выращенных методом блокированного капилляра, были измерены полевые и температурные зависимости токов положительных и отрицательных зарядов. Применение источников на основе углеродных нанотрубок позволило нам впервые наблюдать движение положительных зарядов в образцах твердого тела при температурах ниже 0.1К. Вольт-амперная характеристика может быть описана степенной функцией  $I \sim U^\alpha$ , с показателем степени  $\alpha \gg 2$ , много больше, чем можно ожидать для токов, ограниченных объемными зарядами.

Экспериментально установлено, что устойчивость поверхности сверхтекучего гелия зависит от степени проницаемости стенок для нормальной компоненты. Показано, что в случае попарно проницаемых стенок критическая мощность, при которой наблюдается неустойчивость, растет с повышением температуры в противоположность понижению при полностью непроницаемых стенках.

#### *12.1.5 Самоорганизация частиц*

Осуществлена перестройка оптических и спектральных характеристик фотонных жидкокристаллических структур в широком диапазоне длин волн путём внешних воздействий (температура, освещение). Предложен и реализован метод определения плотности фотонных состояний кирального жидкого кристалла с запрещённой фотонной зоной в диапазоне видимых длин волн. Метод основан на связи разности показателей преломления для волн круговых поляризаций с вращением плоскости поляризации света фотонной структурой. Сопоставление эксперимента с расчётом показало, что групповая скорость света  $v_g$  в середине запрещённой зоны для образца конечной толщины  $d$  превосходит скорость света  $c$  в вакууме ( $v_g \approx 2.05c$  при  $d=5.8$  мкм). Максимумы плотности фотонных состояний определяют длины волн лазерной генерации в фотонной структуре. Исследованы процессы самоорганизации частиц, получены новые упорядоченные структуры из частиц с дипольным взаимодействием в смектических плёнках. Путём сопоставления расчетов смектических структур и температурной последовательности полярных фаз с использованием теории Ландау фазовых переходов с экспериментом определены величины межслоевых взаимодействий, приводящих к образованию многослойных антисегнетоэлектрических и сегнетоэлектрических структур.

#### *12.1.6 Новые сорбционные материалы*

Новые сорбционные материалы получены путем нековалентной модификации многослойных углеродных нанотрубок. Увеличение числа донорных групп в молекуле фосфорорганического комплексообразователя приводит к существенному увеличению эффективности сорбции ионов редкоземельных элементов из азотнокислых растворов. Обнаружена уникальная способность таких сорбентов эффективно извлекать ионы палладия из растворов в широком интервале концентрации азотной кислоты.

#### *12.1.7 Перемагничивание низкоразмерных структурированных магнитных пленок*

Изучено влияние формы и краев низкоразмерных структурированных магнитных пленок  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (30 нм) на процессы их перемагничивания. Кинетика процессов преобразования доменной структуры полос, ширина которых была 30, 10 и 3 мкм, регистрировалась с использованием метода магнитооптической индикаторной пленки. Экспериментально и с помощью микромагнитного моделирования показано, что решающую роль в формировании неоднородного распределения спинов и мод перемагничивания в тонких магнитомягких пленках играют магнитостатические поля, формируемые на краях полос и вблизи их пересечений. В частности, благодаря этому, в полосах, параллельных приложенному полю, вдоль их сторон формируются связанные пары спиновых вихрей. Обнаружена обратно пропорциональная зависимость критических полей  $H_{\text{CR}}$  их зарождения от ширины полос. Установлено, что  $H_{\text{CR}}$  зависит также от размера структур, внешних по отношению к изучаемым.

#### *12.1.8 Моделирование распределения намагниченности в ферромагнитной пленке*

В пределе нулевой анизотропии проведено микромагнитное моделирование распределения намагниченности в ферромагнитной пленке с

синусоидальным, прямоугольным и зубчатым краем с целью определения влияния формы тонкопленочных элементов на моды их перемангничивания во вращающемся магнитном поле. Расчеты показали, что решающую роль при перемангничивании играет образование регулярной макроскопической вихревой структуры вдоль краев пленки, обусловленной особенностями формирования локальных полей рассеяния вдоль пленки со сглаженными или прямолинейными краями. Результаты экспериментального изучения и проведенных расчетов позволяют оптимизировать форму и размер разрабатываемых магнитных тонкопленочных наноразмерных элементов запоминающих устройств вычислительной техники и сенсоров, таких как, например, высокочувствительные феррозонды, при их проектировании.

#### *12.1.9 Формирование гармоник в системе капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия*

Экспериментально исследовано формирование гармоник на частотах ниже частоты накачки в системе капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия в турбулентном режиме при монохроматической накачке. Показано, что выбором спектральной характеристики возбуждающей силы и дискретности в спектре поверхностных колебаний, изменяя границы экспериментальной ячейки, удастся создать условия для генерации волн в низкочастотном диапазоне. На поверхности жидкого водорода низкочастотные гармоники наблюдаются только в прямоугольной ячейке при определенных частотах монохроматической накачки. Передача энергии, как в низкочастотные субгармоники, так и в высокочастотные гармоники обусловлена трехволновыми процессами распада волн. На поверхности сверхтекучего гелия в цилиндрической ячейке обратный каскад формируется в результате трехволновых процессов распада, причем около 90% энергии сосредотачивается в обратном каскаде.

#### *12.1.10 Когерентная динамика решетки висмута*

Проведены экспериментальные исследования когерентной динамики решетки висмута в широком диапазоне температур (от гелиевой до комнатной) при сильном и слабом возбуждении. Экспериментально показано, что интерференция Фано (между дискретным фононным уровнем и электронным квазиконтинуумом) ответственна за формирование начальной фазы когерентных фононов большой амплитуды для случая чирпированных осцилляций в висмуте, при этом асимптотическая начальная фаза когерентных фононов однозначно определяется параметром асимметрии Фано. Установлено, что коллапсы и возрождения чирпированных полносимметричных фононов в висмуте возникают вследствие латеральной неоднородности возбуждения и поэтому, являются поляризационными, а не квантовыми биениями. Кроме этого, экспериментально и теоретически продемонстрировано, что в затухание когерентных фононов большой амплитуды наряду с "вязкостным" трением, приводящим к демпфированию кинетической энергии, дает вклад и демпфирование потенциальной энергии, которое доминирует при малых временных задержках.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2015 г. научно-исследовательская деятельность проводилась в соответствии с госзаданием по теме № 12.1 «Нелинейные процессы в нанокompозитных магнитных пленках, жидкокристаллических материалах, на поверхности и в объеме квантовой жидкости». Выполнено экспериментальное изучение и численное моделирование нанокompозитных тонкопленочных ферромагнетиков и мультиферроиков. Изучено влияние формы и краев низкоразмерных структурированных магнитных пленок  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (30нм) на процессы их перемагничивания. Обнаружена обратно пропорциональная зависимость критических полей  $H_{\text{CR}}$  их зарождения от ширины полос. Установлено, что  $H_{\text{CR}}$  зависит также от размера структур, внешних по отношению к изучаемым. В пределе нулевой анизотропии проведено микромагнитное моделирование распределения намагниченности в ферромагнитной пленке с синусоидальным, прямоугольным и зубчатым краем с целью определения влияния формы тонкопленочных элементов на моды их перемагничивания во вращающемся магнитном поле. Расчеты показали, что решающую роль при перемагничивании играет образование регулярной макроскопической вихревой структуры вдоль краев пленки, обусловленной особенностями формирования локальных полей рассеяния вдоль пленки со сглаженными или прямолинейными краями.

Синтезированы и изучены монокристаллические образцы мультиферроика – несобственного сегнетоэлектрика молибдата гадолиния, допированного железом. По совокупности экспериментальных данных сделан вывод, что наиболее вероятным источником ферромагнитного отклика являются кластеры железа малых размеров.

Экспериментально и теоретически продемонстрировано, что в затухание когерентных фононов большой амплитуды наряду с "вязкостным" трением.



Показано, передача энергии, как в низкочастотные субгармоники, так и в высокочастотные гармоники обусловлена трехволными процессами распада волн.

Обнаружена уникальная способность сорбентов на основе нанотрубок эффективно извлекать ионы палладия из растворов в широком интервале концентрации азотной кислоты.

Впервые наблюдено движение заряженных частиц в образцах твердого гелия при температурах ниже 0.1К.

Разработан метод изготовления эмиссионных источников зарядов на основе углеродных нанотрубок.

Разработана методика исследования диэлектрической проницаемости образцов примесь-гелиевого геля с молекулами воды в качестве примесей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долганов П.В., В.К. Долганов Полярные жидкие кристаллы с многослойным упорядочением, Письма в ЖЭТФ 101, 496-500 (2015).
2. Долганов П.В., Н.С. Шуравин, В.К. Долганов, Е.И. Кац Топологические дефекты в смектических островах в свободно подвешенных плёнках, Письма в ЖЭТФ 101, 505-511 (2015).
3. Долганов П.В., В.К. Долганов, Е.И. Кац Аномалии мениска микровключений в свободно подвешенных смектических плёнках, Письма в ЖЭТФ 102, 269-274 (2015).
4. Левченко А.А. , Абдурахимиов Л.В., Бражников М.Ю., Лихтер А.М., Ремизов И.А. «Формирование низкочастотных гармоник на поверхности жидкого водорода и гелия» с.91 (2-15) Актуальные проблемы физики конденсированного состояния. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015. – 185 с. ISBN 978-5-7691-2418-1
5. Мисочко О.В., М.В. Лебедев Журнал "Об интерференции Фано при возбуждении когерентных фононов: Связь между параметром асимметрии и начальной фазой когерентных осцилляций" ЖЭТФ 147 №2 750 (2015).
6. Мисочко О.В., А.А. Мельников, С.В. Чекалин, А.Ю. Быков Журнал "Особенности когерентных фононов сильного топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ " Письма в ЖЭТФ 102 №4 265 (2015).
7. Abdurakhimov L.V., Arefin M., Kolmakov G.V., Levchenko A.A., Lvov Y.V., Remizov I.A. "Bidirectional energy cascade in surface capillary waves" Physical Review E, 91 (2), 023021. 2015
8. Abdurakhimov L.V., Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A. и др. "Formation of low-frequency harmonics on the surface of liquid hydrogen and helium in a turbulent regime" Low Temperature Physics том 41, выпуск 3, стр. 163-168, 2015

9. Borisenko D.N., P. M. Walmsley, A. I. Golov, N.N. Kolesnikov, Yu. V. Kotov, A.A. Levchenko, L. P. Mezhov-Deglin, M. J. Fear. Nanotube-based source of charges for experiments with solid helium at low temperatures. Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur, 2015, v. 41, No. 7, pp. 729-732.
10. Bozhko S.I., A.S. Ksenz, A.M. Ionov, D.A. Fokin, V. Dubost, F. Debontridder, T. Cren, D. Roditchev.« Simulation of Lead Nanoislands Growth using Density Functional Theory» Physics Procedia, 71, 2015, Pages 332–336.
11. Brazhnikov M.Y., Levchenko A.A., Mezhov-Deglin L.P., Remizov I.A. “Wave turbulence on the surface of liquid hydrogen in restricted geometry: the influence of the boundary conditions” Low Temperature Physics, 41 (6) 615-619, 2015
12. Dolganov P.V. Density of photonic states in cholesteric liquid crystals, Phys. Rev. E 91, 042509 (2015)
13. Dolganov P.V., V.K. Dolganov, A. Fukuda Surface  $2\pi$ -walls in polar free-standing smectic films, Письма в ЖЭТФ 101, 851-856 (2015).
14. Dolganov P.V. and V.K. Dolganov Electric Field Induced Transitions in Polar Liquid Crystals with Frustrating Interlayer Interaction, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 610, 35-43 (2015).
15. Efimov V.B., L.P. Mezhov-Deglin, C. D. Dewhurst, A.V. Lokhov, and V.V. Nesvizhevsky, «Neutron scattering on impurity nanoclusters in gel samples» журнал: Advances in High Energy Physics, vol. 2015, ID 808212
16. Efimov V., A.Izotov, L.Mezhov-Deglin, V.Nesvizhevskii, O.Rybchenko, A.Zimin, Structural And Phase Transitions In Nanocluster Ethanol Samples At Low Temperatures, ФНТ, 6, 603-607, 2015
17. Ishioka K., M. Kitajima, O.V. Misochko, and T. Nagao Журнал "Ultrafast phonon dynamics of epitaxial atomic layers of Bi on Si(111)" Phys. Rev. B 91, 125431 (2015).

18. Levchenko A.A., Likhter A.M. Khramov D.A. и др. "Shielding characteristics of water" Low Temperature Physics том 41 выпуск 6, стр. 461-464, 2015
19. Misochko O.V., J. Flock, and T. Dekorsy Журнал "Polarization dependence of coherent phonon generation and detection in the three-dimensional topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>" Phys. Rev. B 91, 174303 (2015).
20. Nurgaliev Timerfayaz, Uspenskaya Ludmila. A simple model for investigation of the pair breaking effect on the parameters of HTS/FM thin films. Solid State Phenomena v233-234p662-665(2015).

## Форма 2

**Сведения о выполнении количественных показателей индикаторов эффективности  
фундаментальных научных исследований, реализуемых Программой в 2015 году  
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института физики твердого тела Российской академии наук)**

Индикаторы	Единица измерения	2015 год	
		план	фактическое исполнение
Количество публикаций по теме 8.1. Электронные явления и квантовый транспорт в сильно-коррелированных металлических, полупроводниковых и гибридных системах	шт	<b>28</b>	<b>28</b>
Количество публикаций по теме 8.2. Межчастичные взаимодействия и коллективные явления в электронных и экситонных системах в полупроводниковых наноструктурах	шт	<b>25</b>	<b>25</b>
Количество публикаций по теме 8.3. Самоорганизация наноструктурированных систем и физика дефектов в полупроводниках и диэлектрика	шт	<b>13</b>	<b>14</b>
Количество публикаций по теме 8.4. Фазовые превращения, структура (атомная, магнитная, дефектная) и свойства кристаллов, неупорядоченных и композиционных микро- и наносистем при нормальном и высоком давлении	шт	<b>27</b>	<b>28</b>
Количество публикаций по теме 9.1 Жаропрочные материалы для новой техники	шт	<b>23</b>	<b>23</b>
Количество публикаций по теме 9.2. Новые функциональные материалы для микроэлектроники, оптоэлектроники и эффективного преобразования энергии	шт	<b>20</b>	<b>21</b>
Количество публикаций по теме 12.1. Нелинейные процессы в	шт	<b>20</b>	<b>20</b>

нанокompозитных магнитных пленках, жидкокристаллических материалах, на поверхности и в объеме квантовой жидкости			
Количество публикаций по Программе РАН 1.32П. "Электронный спиновый резонанс, спинзависящие электронные эффекты и спиновые технологии	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН РАН IV.2.1. Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН I.13.П Теплофизика высоких плотностей энергии	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН I.2П Актуальные проблемы физики низких температур	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН IV.2.2 Электронный корреляции в системах с сильным взаимодействием	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН I.19П Сверхчувствительные сенсоры и гигантское усиление полей оптическими метаматериалами	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН IV.2.3 Спиновые явления в твердотельных наноструктурах и спинтроника	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН I.1П Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий	шт	<b>2</b>	<b>2</b>
Количество публикаций по Программе РАН IV.2.4 Физика новых материалов и структур	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН I.34П Материя при высоких давлениях	шт	<b>1</b>	<b>1</b>
Количество публикаций по Программе РАН	шт	<b>1</b>	<b>1</b>

I.37П Нелинейная динамика в математических и физических науках			
---	--	--	--