

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ И НАУЧНО-
ОРГАНИЗАЦИОННОЙ РАБОТЕ ЗА 2014 ГОД**

**Директор ИФТТ РАН
Член-корреспондент РАН**

Кведер В.В.

**Ученый секретарь ИФТТ РАН
д.ф.-м.н.**

Абросимова Г.Е.

Научные результаты, полученные в рамках выполнения Госзадания.

Тема № 8.1 Электронные явления и квантовый транспорт в сильно-коррелированных металлических, полупроводниковых и гибридных системах. (Раздел II. "Физические науки», подраздел 8. "Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости". Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Детально изучены абрикосовские и джозефсоновские вихревые структуры в монокристаллах оксидных высокотемпературных сверхпроводников висмутового ряда: (2212) BSCCO и (2201) BSLCO в наклонных магнитных полях; измерена анизотропия сверхпроводящего параметра порядка в направлении поперёк базисной плоскости, проведено сравнение с анизотропией сопротивления в нормальном состоянии. Исследовано поведение вихрей Абрикосова, индуцированных в нормальный металл за счет эффекта близости в бислое сверхпроводник-нормальный металл.

Исследованы температурные и частотные зависимости комплексной высокочастотной проводимости гетероструктур $\text{La}_{1.65}\text{Sr}_{0.45}\text{CuO}_4/\text{La}_2\text{CuO}_4$ при магнитном поле параллельном и перпендикулярном к сверхпроводящему двумерному слою толщиной 0,2 нм. Обнаружено, что: (i) действительная часть проводимости имеет на 2К более низкую температуру сверхпроводящего перехода (T_c), чем его мнимая часть; (ii) это аномальное смещение T_c не зависит от слабого перпендикулярного магнитного поля вплоть до 0.01Т. Такое поведение T_c обнаружено впервые в двумерных сверхпроводниках и является темой дальнейших исследований.

На основе экспериментов в импульсных магнитных полях до 50 Т построена фазовая диаграмма верхнее критическое магнитное поле, H_{c2} , – температура, T , для сверхпроводящих пниктидов (монокристаллы $\text{Eu}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{Fe}_2\text{As}_2$) и халькогенидов (монокристаллы $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ и

эпитаксиальные пленки $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на CaF_2), из экспериментов в импульсных магнитных полях до 50 Т. Показано, что $H_{c2} - T$ диаграмма для перечисленных сверхпроводников сильно анизотропна и зависит от ориентации магнитного поля относительно двумерных ab слоев.

Обнаружены сверхпроводящие корреляции при температуре $T_c \sim 20\text{K}$ в образцах Cu/CuO_x , полученных ударно-волновым сжатием до 35 ГПа металлооксидной смеси Cu/CuO . Выявлены признаки сверхпроводимости при температуре $T_c \sim 10\text{K}$ в образцах, полученных анодированием тонких (50-100 нм) плёнок алюминия.

Исследован новый молекулярный сверхпроводник β "-(BEDT-TTF) $_4\text{K}_x(\text{H}_3\text{O})_{1-x}[\text{RuIII}(\text{ox})_3]\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$ ($x \sim 0.8$) на основе катион-радикальной соли BEDT-TTF с парамагнитным три(оксалато)рутенатным анионом. В магнитных полях (7 – 17) Тл наблюдались осцилляции Шубникова-де Газа, из периода которых получены данные о ферми-поверхности кристалла. Кристалл оказался сверхпроводником ниже температуры $T_c = 6.3\text{ K}$.

Определены параметры тензора сверхтонкого взаимодействия спина ядра ^{13}C из центральной $\text{C}=\text{C}$ связи в молекуле BETS со спином p_i -электрона в органическом металле k -(BETS) $_2\text{Mn}[\text{N}(\text{CN})_2]_3$. Полученная информация является ключевой для определения из спектров ЯМР структуры электронной спиновой системы в магнитно-упорядоченном состоянии (при $T < 20\text{K}$).

На кристаллах органического металла α -(BEDT-TTF) $_2\text{KHg}(\text{SCN})_4$ исследовано состояние с волной зарядовой плотности (ВЗП). Обнаружена инверсия осцилляций межслоевого сопротивления в состоянии ВЗП, которая не наблюдается в эффекте де Газа - ван Альфена. Показано, что эта аномалия возникает при наличии магнитного пробоя. Построена теоретическая модель, объясняющая это явление в предположении пространственно флуктуирующей магнитопробойной щели.

Обнаружены и исследованы новые когерентные явления в гибридных системах на основе сверхпроводников, нормальных металлов, ферромагнетиков и полупроводников. Среди них: наблюдение нелокальных эффектов, вызванных неравновесной квазичастичной инжекцией; реализация джозефсоновских структур, управляемых магнитным полем и инжекцией спин-поляризованных носителей; магнитное подавление осцилляций критического тока в джозефсоновских переходах на основе нанопроволок из нормального металла и полупроводника; безотражательное туннелированием на границе сверхпроводник – диффузный металл (полупроводник).

Изготовлены и исследованы сверхпроводящие двухуровневые системы (кубиты), использующие сверхпроводящие инверторы фазы (ри-контакты) для смещения в рабочую точку.

С помощью туннельных (СТМ) измерений исследован инверсный эффект близости на границе сверхпроводник - топологический изолятор. Обнаружена наведенная сверхпроводящая минищель в топологическом изоляторе, простирающаяся на сравнительно большие расстояния (не менее 50нм).

В гибридных структурах InGaAs-S (двумерная электронная система-сверхпроводник) наблюдались проявления сильного спин-орбитального взаимодействия при отражении нормальных электронов от границы 2D-металл-сверхпроводник. Обнаружен и исследован перенос энергии между гальванически разделенными токнесущими хиральными каналами в режиме целочисленного квантового эффекта Холла. Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено слияние квантовых уровней с различными спиновыми и долинными индексами в сильно-коррелированных двумерных электронных системах.

В квазиклассическом двумерном баллистическом контакте, сформированном в двумерной электронной системе в арсениде галлия, обнаружен недавно предсказанный аналог эффекта увлечения между инжектированным и налетающим пучками электронов, что приводит в

заметному уменьшению сопротивления контакта как функции приложенного напряжения. Исследование дробового шума в таком микроконтакте позволяет однозначно судить о ключевой роли межэлектронного рассеяния.

Теоретически исследовано влияние магнитного поля параллельного плоскости бислоя сверхпроводник- ферромагнетик на неоднородное сверхпроводящее состояние Ларкина-Овчинникова-Фулде-Феррела (FFLO). Показано, что в подобных гибридных системах в FFLO состоянии орбитальный эффект поля может приводить к росту критической температуры системы по сравнению с ее значением при нулевом поле.

Проведен расчет фазовой диаграммы бислоя сверхпроводник/ ферромагнетик в неравновесных условиях. Рассмотрено обычное, независимое от спина, неравновесное распределение квазичастиц, которое создается электрическим током, пропускаемым через систему и спин-зависимое неравновесие, создаваемое инжекцией тока через сильный ферромагнетик. Показано, что независимое от спина неравновесие всегда приводит только к подавлению сверхпроводимости в системе. Напротив, зависящее от спина неравновесие может стимулировать сверхпроводимость в бислойной системе за счет компенсации распаривающего эффекта обменного поля ферромагнетика.

Руководитель – д.ф.м.н., проф. В.В.Рязанов

Тема № 8.2 Межчастичные взаимодействия и коллективные явления в электронных и экситонных системах в полупроводниковых наноструктурах. (Раздел II. "Физические науки», подраздел 8. "Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости". Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы).

Разработана методика измерений двухфотонных корреляций люминесценции экситонных поляритонов с разрешением между парами регистрируемых фотонов до 4 пс и изготовлена экспериментальная установка и выполнены измерения корреляционной функции второго порядка в конденсате экситонных поляритонов в высокодобротном GaAs планарном микрорезонаторе с квантовыми ямами в активной области при межзонном возбуждении.

Исследованы непрямые экситоны в GaAs/AlAs гетероструктурах, где фотовозбужденные и связанные в экситоны электроны и дырки разделены не только в реальном, но и в импульсном пространстве. Установлено, что времена жизни таких экситонов достигают. Исследованы условия наблюдения компенсации зеемановского спинового расщепления в вырожденном экситонном бозе-газе. Исследовано влияние экситон-экситонного взаимодействия на зеемановское расщепление пространственно-непрямых диполярных экситонов в магнитном поле, перпендикулярном плоскости квантовой ямы при накоплении их в латеральной электростатической ловушке. Установлено, что эффект компенсации спинового расщепления наблюдается только в условиях нейтрального зарядового баланса – в заряженной квантовой яме подавление зеемановского расщепления отсутствует.

Развита модель спин-решеточной релаксации в II-VI полумагнитных полупроводниках с различным содержанием магнитных примесей Mn^{2+} . Определены вероятности образования кластеров магнитных ионов различных размеров. С помощью экспериментально измеренных значений коэффициентов спиновой диффузии определены характерные времена достижения спиновым возбуждением этих кластеров. Проведено их сравнение с экспериментальными значениями времен спин-решеточной релаксации. Показано, что времена спин-решеточной релаксации в полумагнитных полупроводниках с содержанием ионов Mn^{2+} от 2 до ~15% определяются внутренними временами релаксации намагниченности кластеров размером от 3 до 8 ионов.

Исследован эффект магнитного поля на сверхпроводящие плоские контакты с сильным джозефсоновским взаимодействием и ангармоническим соотношением ток-фаза. Вычислены глубина проникновения магнитного поля в контакт, модуляция тока магнитным полем и структура джозефсоновского вихря как функции констант джозефсоновского взаимодействия и распаривающего эффекта вблизи прослойки. Показано, что в планарных сверхпроводниках, представляющих собой контакт сверхпроводник-ферромагнетик, и находящихся в состоянии Ларкина-Овчинникова-Фульде-Ферреля, внешнее магнитное поле может приводить к повышению критической температуры.

Исследована релаксация коллективных спиновых возбуждений в квазидвумерных электронных системах в состоянии «мягкого» ферромагнетика при факторе заполнения 1, предложен механизм, объясняющий экспериментально обнаруженное аномально большое время жизни спиновых возбуждений: релаксация спиновых возбуждений обусловлена аннигиляцией спиновых экситонов на плавном случайном потенциале, при этом переворот спина обеспечивается спин-орбитальным взаимодействием электронов.

Исследованы механизмы спинового расщепления энергетического спектра двумерных электронов в односторонне легированной GaAs/AlGaAs квантовой яме. Показано, что интерфейсное спин-орбитальное взаимодействие заметно компенсирует вклад объемного механизма Дрессельхауза и усиливает механизм Бычкова-Рашбы. Найдена аналитическая связь между константами Дрессельхауза и Рашбы и компонентами анизотропного и нелинейного по магнитному полю тензора g -фактора в наклонном квантующем магнитном поле. Из сравнения теории с экспериментом извлечены параметры Дрессельхауза и Рашбы, а также измерена их зависимость от концентрации электронов.

Исследована спиновая релаксация квазидвумерных электронов в режиме квантового эффекта Холла с полной спиновой поляризацией

двумерных электронов. Обнаружены очень длинные времена спиновой релаксации, на порядок превышающие все ранее измеренные времена в двумерном электронном газе. Показано, что времена релаксации электронов в режиме квантового эффекта Холла с фактором заполнения 1 не зависят от электронной температуры и плотности спиновых экситонов, а также имеют необычную зависимость от магнитного поля.

Разработана технология изготовления мозаичных металлических затворов на GaAs/AlGaAs гетероструктурах с квантовыми ямами с целью их использования для управления спином экситонов в квантовых ямах. Изготовлены структуры с мозаичными металлическими затворами с диаметром отверстий от 1.7 до 0.6 мкм. Найдено, что время релаксации спина экситонов зависит как от диаметра отверстий, так и от приложенного напряжения. Наибольшее время релаксации – 40 нс – достигнуто в структурах с диаметром отверстий 0.6 мкм.

Впервые предложена и реализована «инвертированная» структура диода с применением оксидов MgO и MoO₃ в качестве катода и анода, и модельного полимера PFO в качестве излучающего слоя. Разработана оригинальная методика создания слоя MgO путем окисления пленки металла в воздушной атмосфере. Полученные образцы OLED продемонстрировали выдающуюся стабильность и вдобавок характеристики электролюминесценции, превосходящие OLED со стандартным дизайном органического светодиода с применением щелочного металла в качестве катода.

Руководитель – д.ф.м.н., член-корр. РАН, проф. В.Д.Кулаковский

Тема № 8.3 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". Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы).

Разработана технология формирования однородного покрытия графена толщиной от одного до нескольких монослоев на тонких пленках SiC(001), выращенных на пластинах Si(001). Показано, что однородное графеновое покрытие на вицинальной поверхности SiC(001) образовано нано-лентами, разделенными между собой междоменными границами одной предпочтительной ориентации. Построена и изучена поверхность Ферми, обнаружены поверхностные состояния, вызванные наличием границ между нанодоменами.

Исследования электронной структуры РЗМ комплексов симметричных и несимметричных порфиринов методом ФЭС показали, что введение атома РЗМ (Lu, Er, Yb) в центр порфирина приводит к выравниванию электронной плотности между азотами пиррольной и азидной группы и появлению одного уширенного пика N1s состояния. В ФЭС спектрах несимметричных порфиринов присутствует двухпиковая структура N1s, представленная суперпозицией порфириновой и пиридинильной групп азота. В спектрах состояний Yb4d металлопорфирина наблюдается мультиплетное расщепление Yb4d состояний, подтверждает трёхвалентное состояние иттербия в исследуемых металлопорфиринах.

Проведены исследования малоугловой межзеренной границы в тонкой монослойной пленке C₆₀ на поверхности WO₂/W(110). Показано, что малоугловая граница хорошо описывается в рамках диполей дисклинаций. Проведены расчеты полей упругих напряжений вблизи межзеренной границы. Показано, что области повышенной упругой энергии коррелируют с локальными участками поверхности, где при комнатной температуре наблюдаются статические (не вращающиеся) молекулы.

Методами сканирующей зондовой микроскопии и электронной спектроскопии (ДМЭ, ОЭС, ФЭС) изучены условия формирования, атомная и электронная структура упорядоченных низкоразмерных (1D-, 2D-) систем на базе чистых и декорированных атомами металлов (Ag, Gd) вицинальных поверхностей кремния Si(hhm). Продемонстрирована

возможность создания регулярных ступенчатых матриц без сбоев периодичности на атомном уровне на участках поверхности размерами 500-600 нанометров, а также анизотропных (островковых и цепочечных) наноструктур серебра и гадолиния на ступенчатой поверхности Si(557).

Исследован вопрос о сжатии классической информации, когда приемник имеет доступ только к побочным квантовым состояниям, ассоциированным с классическими состояниями источника, которые непосредственно недоступны. Такая ситуация имеет место при передаче секретных ключей при помощи квантовых состояний. Для того, чтобы подслушиватель смог восстановить всю информацию источника, требуется некоторое дополнительное количество побочной классической информации, которая может быть получена из побочных источников, например, при активном зондировании состояния передатчика. Получена фундаментальная граница на минимально необходимое количество побочной классической информации, которой достаточно для полного восстановления передаваемых квантовых состояний.

Была исследована криптографическая стойкость систем квантовой криптографии, использующих различные протоколы квантового распределения ключей (фазовое кодирование, поляризационное и дифференциально-фазовое) как в оптоволоконном варианте, так и для открытого пространства, а также систем на композитных фотонах (кутритах). Предложен способ мультиплексирования в релятивистской квантовой криптографии, использующей пространственно протяженные квантовые состояния. Изучена стойкость такой системы.

Установлено, что в процессе своего движения при температуре 600°C дислокации в кремнии генерируют дефекты, которые оказывают сильное влияние на диффузию и концентрацию атомов золота в узлах решетки кремния. Показано, что эти дефекты имеют вакансионную природу и электрически неактивны до взаимодействия с золотом. В отличие от атомов золота, атомы никеля не взаимодействуют с этими вакансионными дефектами. Это позволяет предположить, что энергия связи этих дефектов

больше 2эВ. Показано, что в образцах кремния с высокой концентрацией кислорода подобные дефекты могут играть большую роль в образовании новых термодоноров.

Методом наведенного тока в растровом электронном микроскопе (ЕВІС) и методом тока, индуцированного световым пучком (LВІС), исследованы структурные дефекты, влияющие на эффективность солнечных элементов на основе мультикристаллического кремния. Показана возможность выявления корреляции между закоротками солнечных элементов и электрически активными структурными дефектами путем сопоставления изображений, полученных методами LВІС, ЕВІС и электролюминесценции.

Исследованы процессы излучательной электрон-дырочной рекомбинации в квазидвумерных дислокационных структурах высокой плотности, образованных на границе соединенных разориентированных пластин Si. Обнаружена корреляция концентрации глубоких центров в таких дислокационных системах с плотностью дислокационных сеток. На основании полученных данных предложена предварительная модель, объясняющая особенности спектрального распределения интенсивности люминесценции в зависимости от параметров дислокационной структуры. Исследована также фотолюминесценция в пластически деформированных образцах германия n-типа после их легирования медью и последующей термообработкой в интервале температур 200-500С.

Обнаружено образование аномально длинных цепочек из наночастиц (длиной до 60 см) в газовой среде при плазменном и лазерном испарении металлов, объясняемое пульсирующей конденсацией самоуплотняющихся микропотоков пара. Такое явление наблюдается впервые и дает возможности создания новых видов радиационных детекторов и биосенсоров. Обнаружено формирование периодических микроструктур в композициях из биомолекул и неорганических наночастиц, объясняемое появлением дипольного отталкивания между сближающимися противоположно заряженными гидратами нанообъектов

в водной среде. Это может быть положено в основу новых методик оптоэлектронного и биомедицинского назначения.

Руководитель – д.ф.м.н., член-корр. РАН, проф. В.В.Кведер

Тема № 8.4 Фазовые превращения, структура (атомная, магнитная, дефектная) и свойства кристаллов, неупорядоченных и композиционных микро- и наносистем при нормальном и высоком давлении. (Раздел II. "Физические науки», подраздел 8. "Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости". Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Зависимость структуры и свойств от уровня механических напряжений исследована в микропроводах в стеклянной оболочке сплавов типа сплава Гейслера систем NiMnGa и NiMnIn. Определен фазовый состав образцов, установлены параметры решеток кристаллических фаз. Показано, что отжиг в сплавах с наиболее высоким уровнем внутренних механических напряжений приводит к формированию двухфазной кристаллической структуры и значительному изменению магнитных свойств (температурной зависимости намагниченности, коэрцитивной силы). Двухфазная кристаллическая структура (мартенситная + аустенитная фазы) в микропроводах NiMnGa определяет их необычное магнитное поведение.

Исследованы общие закономерности структурных превращений в манганитах лантана при введении двухвалентной примеси (Ca, Sr, Ba), замещающей трехвалентный лантан. Определены основные факторы, существенно влияющие на структурные превращения и физические свойства манганитов лантана: соотношение валентных состояний марганца Mn^{3+}/Mn^{4+} , наличие межзельного кислорода и ионный радиус легирующего элемента.

Изучены ИК спектры поглощения, спектры фотолюминесценции и кристаллическая структура твердых растворов $Lu_{0.99-x}Re_xEu_{0.01}VO_3$

(Re=Gd, Tb, Dy, Y). Установлено, что при $x < 0.15$ образцы, полученные при 970°C , имеют структуру кальцита, для которой характерно оранжевое свечение. При $x > 0.15-0.2$ соединения $\text{Lu}_{0.99-x}\text{Re}_x\text{Eu}_{0.01}\text{VO}_3$ имеют структуру ватерита, спектр свечения которого находится в красной области спектра.

Доказано, что γ -фазы (моногидриды с гранецентрированной орторомбической структурой) в системах Ti-H, Ti-D и Zr-H, Zr-D, которые считаются метастабильными фазами и потому не указываются на равновесных фазовых диаграммах, на самом деле термодинамически устойчивы при нормальных условиях. В этих системах при температурах, примерно, на 200°C ниже хорошо изученного эвтектоидного превращения $\beta(\text{ОЦК}) \rightarrow \alpha(\text{ГПУ}) + \delta(\text{ГЦК})$, имеется еще одно, перитектоидное превращение $\alpha + \delta \rightarrow \gamma$.

В системах Rh-H и Ni-H методом закалки до 80 К построены закритические изотермы растворимости водорода при температуре 600°C и давлениях водорода до 7 ГПа. Обнаружено, что с ростом температуры положение точки перегиба на изотермах (аналог линии Видома в однокомпонентных системах) значительно отклоняется в сторону низких давлений от монотонного продолжения линии изоморфного превращения «металл \leftrightarrow гидрид». Закритическое поведение систем металл-водород ранее не изучалось.

Исследована структура монокристаллов трех новых гетерометаллических магнитных комплексов, содержащих комбинацию центрального $[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$ ядра и нескольких терминальных $[\text{Mn}^{\text{III}}(\text{salpn})]^+$ фрагментов. В кристаллах одного из этих комплексов, $[\text{Mn}^{\text{III}}_6\text{Fe}^{\text{II}}]$, блоки формируют бесконечные цепочки, и наблюдается ферромагнитное взаимодействие Mn^{III} центров ($J = 0.64 \text{ cm}^{-1}$).

Изучены структуры ряда новых молекулярных моторов, содержащих органические молекулы с одним или двумя центральными роторными бициклооктановыми фрагментами. В одном из них обнаружен переход из моноклинной фазы в триклинную при $T \sim 257 \text{ K}$.

Проведен сравнительный анализ однотипных структур $(\text{MDABCO}^+)(\text{C}_{60})\text{TPC}$ и $(\text{MQ}^+)(\text{C}_{60})\cdot\text{TPC}$. Сделан вывод, что увеличенные меж-фуллереновые расстояния в треугольной решетке $(\text{MQ}^+)(\text{C}_{60})\cdot\text{TPC}$ приводят к уменьшению ширины зоны и подавлению металлического проводимости с переходом в состояние Мотт-Хаббардовского диэлектрика с антиферромагнитным упорядочением фрустрированных спинов.

Руководитель – д.ф.м.н., В.Е.Антонов

Тема № 9.1 Жаропрочные материалы для новой техники. (Раздел II. "Физические науки», подраздел 9. "Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы (в области физики и технологии новых функциональных материалов для эффективного преобразования энергии)". Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы).

Изготовлены опытные образцы высокочистого по кислороду (содержание кислорода менее 10 ppm) сплава Mo-0,5вес.%Ta. Образцы показали высокую пластичность при ковке, прессовании, прокатке.

Получены образцы – естественные композиты на основе эвтектики Nb-Nb₅Si₃ с уровнем кратковременной прочности при 1300 °C 900 МПа и 100-часовой прочностью 200 МПа при этой же температуре. Получены два различных слоистых композита упрочненных в одном случае сплошными слоями интерметаллидов нестехиометрического состава Nb₂Al и Nb₃Al. А во втором – слоями интерметаллидов с паутинообразными выделениями двухфазной области Nb_{ss}+ Nb₃Al на основе ниобия чередующихся со сплошными того же состава. Испытания на трехточечный изгиб при комнатной температуре показали $\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{тц}} = 927$ МПа для первого, и $\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{тц}} = 367$ МПа – второго образца. А высокотемпературная (T = 1300°C) прочность составила $\sigma_{\text{в}} = 420$ МПа и $\sigma_{\text{тц}} = 327$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 375$ МПа и $\sigma_{\text{тц}} = 275$ МПа соответственно для первого и второго сплава соответственно.

Разработано прецизионное устройство динамического взвешивания монокристалла сапфира, выращиваемого из расплава методом Киропулоса. Разработан и программно реализован автоматический регулятор, обеспечивающий надежное автоматическое управление на протяжении всего процесса выращивания. Регулятор обеспечивает одновременное управление по каналам мощности нагревателя и скорости вытягивания кристалла. Для расчета опорного значения регулятора получено уравнение наблюдения датчика веса кристалла и рассчитана форма кристалла на основе гидростатической модели массопереноса процесса выращивания. Создана автоматизированная установка НИКА-М80 и разработан автоматизированный процесс выращивания монокристаллов сапфира массой 80 кг.

Продемонстрированы технологические возможности выращивания объемных монокристаллов карбида кремния на автоматизированной промышленной установке SiC-1, разработанной Экспериментальным заводом научного приборостроения ЭЗАН по техническому заданию ИФТТ РАН. Установка позволяет выращивать кристаллы диаметром до 100 мм, высотой до 30 мм. Методами сканирующей электронной микроскопии, комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции исследованы структурные дефекты в монокристаллах карбида кремния 6H-SiC, выращенных методом PVT. Удалось наблюдать такие дефекты как микротрубки и паразитные поли типы 4H и 15R в монокристалле 6H-SiC и предложить механизм их образования. На основе результатов исследований и математического моделирования тепломассопереноса процесса роста разработан опытный тепловой узел для выращивания монокристаллов SiC диаметром 4 дюйма.

3. Разработана физическая модель процесса и на основе математического моделирования с помощью пакета ANSYS Multiphysics проведено исследование влияния конструкции теплового узла и режимов процесса кристаллизации на распределение температуры, термические напряжения и концентрацию дефектов в кристалле. Верификация результатов,

выполненная на основе исследования структурного совершенства выращиваемых кристаллов, демонстрирует, что результаты расчетов адекватно описывают закономерности формирования дефектной структуры, обусловленной тепломассопереносом процесса кристаллизации.

Получены композиты с монокристаллическим волокном $2\text{Al}_2\text{O}_3$ SiO_2 и с Nb матрицей, превосходящей по жаростойкости $2\text{Al}_2\text{O}_3$ SiO_2 -Mo. Исследованы композиты с Mo матрицей: с оксидными волокнами содержащими Er и Yb; и с эвтектическими волокнами на основе Al_2O_3 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, ZrO_2 и матрицей из высокоэнтропийного сплава. Впервые получены волокна Mo_3Si . Прочность композитов Mo_3Si -Mo при 1300°C более 500 МПа. Получены композитные волокна на основе Al_2O_3 , $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{BaAl}_{12}\text{O}_{19}$ с прочностью $\sigma \approx 1000$ МПа на базе 1мм, $\sigma \approx 400$ МПа на базе 1мм, обеспечивающих прочность σ и трещиностойкость K_{c} композитов с рекристаллизованной Mo матрицей при н.у.: $\sigma = 590$ МПа, $K_{\text{c}} = 23.2$ МПа $\cdot\text{м}^{1/2}$, с матрицей Nb_3Al : $\sigma = 246$ МПа.

Разработана методика получения материалов на основе карбидокремниевой керамики путём силицирования углерод содержащей матрицы не содержащей первичного карбида кремния. Исходная углеродная матрица может обрабатываться обычными резцами для получения сложных геометрических форм. Отсутствие усадок после взаимодействия с кремнием, позволяет создавать детали сложной геометрической формы с минимальным припуском на последующую механическую обработку. Разработана нейрохирургическая система на основе сапфирового многоканального зонда для проведения одновременной лазерной коагуляции, аспирации опухоли и локальных оптических измерений свойств мозговой ткани для более точного и полного удаления опухолевой ткани.

Наблюдалось образование аморфной фазы и нанокристаллической зеренной структуры под воздействием кручения под высоким давлением в

сплавах на основе системы Nd–Fe–В. Наблюдалось формирование аморфных прослоек на границах зерен в легированном железом нанокристаллическом оксиде цинка, синтезированном методом «жидкой керамики» и нанометрических тонких зернограничных прослоек псевдонеполного смачивания в системах Al–Zn и W–C –Co. Обнаружена реверсивное смачивание границ зерен второй твердой фазой, корреляция между энтальпией смешения и смачиванием границ зерен и изучена кинетика роста зернограничных прослоек полного смачивания в сплавах титан-железо.

Руководитель – д.т.н., член-корр. РАН, проф. М.И.Карпов

Тема № 9.2 Новые функциональные материалы для микроэлектроники, оптоэлектроники и эффективного преобразования энергии. (Раздел II. "Физические науки», подраздел 9. "Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы (в области физики и технологии новых функциональных материалов для эффективного преобразования энергии)". Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Разработаны методики получения вертикальной зонной плавкой под давлением инертного газа монокристаллов $GaS_{1-x}Se_x$ ($x=0 - 1$) и $GaSe:Me$ ($Me=In, Al, Er$). Впервые исследована микротвердость (по Виккерсу) на плоскости (0001) кристаллов GaS , $GaS_{1-x}Se_x$ и $GaSe:Me$. Показано, что, вопреки распространенному в литературе мнению, микротвердость слаболегированных кристаллов $GaSe:Me$ и твердых растворов $GaS-GaSe$ не превышает твердости нелегированных кристаллов $GaSe$ и GaS . Изучены некоторые особенности дефектообразования в кристаллах $GaSe:Me$ в сравнении с $GaSe$.

Впервые создана методика эксфолиации слоистых халькогенидов галлия (II), позволяющая изготавливать 2D структуры, имеющие площадь до 1500 мкм^2 . Совместно с University of Manchester и University of Sheffield исследована фотолюминесценция (ФЛ) полученных 2D-

структур. На примере пленок GaSe толщиной 40 нм в микрорезонаторах с распределенными Брэгговскими отражателями из четвертьволновых $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ пар экспериментально показано значительное (до 60-кратного) Парселловское усиление интенсивности при снижении времени затухания ФЛ с длиной волны 603,7 нм на порядок. Полученные результаты позволяют вплотную приблизиться к разработке новых светоизлучающих приборов видимого диапазона спектра.

Методом импедансной спектроскопии в интервале частот 1 Гц - 32 МГц проведены исследования электропроводности монокристаллических и керамических материалов на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами иттрия и скандия, с целью оптимизации состава твердоэлектролитных мембран ТОТЭ, анализа механизмов переноса и изучения процессов деградации материалов в рабочих условиях ТОТЭ. Анализ микротвердости показал отсутствие значимого влияния катионного состава монокристаллов на их механические свойства, которые значительно улучшаются при переходе к газоплотным керамическим мембранам высокой плотности. Анализ импедансных спектров не выявил значительных вкладов сопротивления границ зерен керамики в общее электрическое сопротивление газоплотных мембран при рабочих температурах ТОТЭ.

Метод изотопного обмена применён для исследования коэффициента диффузии и константы поверхностного обмена в зависимости от температуры в новых катодных материалах состава $\text{Sr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$. Показано, что величина коэффициента диффузии кислорода в этом материале на порядок превышает величину коэффициента диффузии кислорода традиционного $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ катода, что свидетельствует о том, что $\text{Sr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$ является перспективным катодным материалом для среднетемпературных ТОТЭ.

При выращивании монокристаллов SiC методом PVT в условиях, близких к равновесным, впервые обнаружен рост углеродных нанокластеров внутри микротрубок. Построены изобарное сечение

диаграммы Si – С и изотермический разрез тройной системы Si – С – Ar. Проведен анализ условий зарождения и роста С-кластеров на основе фазовой диаграммы.

Показано, что наноструктурная неоднородность оксида $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ обусловлена существованием нанометровых (2-5 нм) доменов оксидов разного катионного состава, принадлежащих ряду $\text{Y}_n\text{Ba}_m\text{Cu}_{m+n}\text{O}_y$.

Впервые методом электролиза расплавов выращены осадки кристаллов тетрагонального оксида $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ (123) и исследован его катионный состав.

Выращены кристаллы $\text{BiSrLaCuO}_{6+\delta}$ ($T_c=18\text{K}$), $\text{BiSrLaCuO}_{6+\delta}$ (12K) и $\text{BiPbSrLaCuO}_{6+\delta}$ ($T_c=10\text{K}$). Показана существенная зависимость T_c и ΔT_c от кислородного индекса δ , задаваемого условиями последующего отжига.

Руководитель – д.ф.-м.н. С.И.Бредихин

Тема № 12.1 Нелинейные процессы в нанокompозитных магнитных пленках, жидкокристаллических материалах, на поверхности и в объеме квантовой жидкости. (Раздел II. "Физические науки», подраздел 12. "Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений". Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Изучены моды переключения в тонкопленочных магнитомягких ферромагнетиках (ФМ) NiFe и NiFeCuMo с периодически меняющейся плоскостной анизотропией и пьезоэлектриках с дислокациями. Развита модель рассеяния света на переходной доменной структуре, возникающей в процессе переключения сегнето- или ферромагнетика. Установлено, что ориентация ФМ полос относительно внешнего поля, а также доменные границы (ДГ) и магнитостатические поля, возникающие на краях этих полос, определяют микромеханизмы преобразования намагниченности и доменную структуру в наноразмерных пленках с ограниченным латеральным размером. Изучены закономерности нестационарного

движения ДГ в процессе перемагничивания гетероструктур ферромагнетик/антиферромагнетик (ФМ/АФМ) Co/IrMn. Установлено, что взаимодействие ДГ с дефектами АФМ слоя, также как и взаимодействие дислокаций в сплавах AlMg и MgZr при их пластической деформации, носит универсальный характер. Эта универсальность свидетельствует об одинаковой природе корреляций в обоих процессах и указывает на зависимость статистики лавин в них лишь от распределения центров пиннинга в образцах.

Кинетика перемагничивания ФМ нанослоев изучена в полосах, дисках и кольцах, изготовленных на подслоях ниобия и купрата иттрия. Выявлено как прямое влияние сверхпроводника на перемагничивание магнетика за счет пиннингования ДГ на вихрях и искажение полей рассеяния, так и косвенное – за счет шероховатости интерфейса. Обнаружено явление подавления сверхпроводимости при пропускании спин-поляризованного тока вдоль гибридных структур. Предложен механизм подавления сверхпроводимости обусловленный диффузией спин-поляризованных электронов.

Разработана методика приготовления пленочных автоэлектронных источников зарядов, пригодных для работы при низких и сверхнизких температурах, что впервые позволило наблюдать движение положительных зарядов (заряженных точечных дефектов) и отрицательных зарядов (электронных пузырьков) в кристаллах твердого гелия при температурах ниже 0.1 К. Это открывает возможности изучения взаимодействия зарядов с нейтральными точечными дефектами (вакансиями), линейными дефектами (дислокациями) и двумерными дефектами (границами зерен) в квантовых кристаллах, вклад эффектов подбарьерного квантового туннелирования в подвижность заряженных точечных дефектов при низких и сверхнизких температурах.

Изучена трансформация структуры и оптических характеристик холестерических фотонных кристаллов при изменении температуры, световом воздействии на фоточувствительные материалы. Определены

эффективные ширины фотонных зон, плотности фотонных состояний. Температурная зависимость относительной ширины фотонной зоны и ориентационного параметра порядка описываются теорией Ландау фазовых переходов. Исследована структура включений (смектических островов) в наноплёнках полярных жидких кристаллов. В наноплёнках антисегнетоэлектрических жидких кристаллов обнаружены переходы при изменении размеров включений и толщины наноплёнки, приводящие к изменению ориентационной структуры и оптических характеристик включений. В смектических наноплёнках обнаружен новый механизм самоупорядочения включений, приводящий к образованию в наноплёнках плотноупакованных областей из включений. Путем нековалентной модификации углеродных нанотрубок карбамоилметилфосфиноксидом и ионной жидкостью получены новые композитные материалы, обладающие высокой сорбционной способностью по отношению к РЗЭ, U и Th в азотнокислых средах. Установлено, что предорганизация молекулы карбамоилметилфосфиноксида путем введения в ее метиленовый мостик дополнительной донорной фосфорильной группы приводит к значительному увеличению комплексообразующей способности лиганда.

Экспериментально исследовано формирование гармоник на частотах ниже частоты накачки в системе капиллярно-гравитационных волн на поверхности жидкого водорода 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 в прямоугольной ячейке при определенных частотах монохроматической накачки. Передача энергии, как в низкочастотные субгармоники, так и в высокочастотные гармоники обусловлена трехволновыми и четырехволновыми процессами распада волн.

На примере полносимметричных A_{1g} когерентных фононов висмута, возбуждаемых сверхкороткими лазерными импульсами при гелиевой температуре, показано, что для отрицательных значений параметра асимметрии Фано с уменьшением модуля параметра асимптотическая фаза возрастает. Таким образом, получено достаточно веское экспериментальное подтверждение, что параметр асимметрии Фано q и асимптотическая начальная фаза j гармонического осциллятора, взаимодействующего с континуумом. Установлено, что фазовые спектры когерентных фононов являются значительно более чувствительными к атомным флуктуациям, чем спектры амплитудные. Так для случая слабого возбуждения висмута, при котором в амплитудном спектре отсутствуют особенности на частоте дважды вырожденных E_g фононов, в фазовом спектре существуют нерегулярные скачки фазы на этой частоте. Кроме этого, при возникновении резонанса Фано фазовый спектр демонстрирует возникновение частотного окна, на границах которого фазы совпадают, что существенно отличается от резонанса Брейта-Вигнера, для которого реализуется однократный скачок фазы на π . Границы фазового окна определяются нулями и полюсами профиля Фано. Таким образом, в дополнение к асимметрии спектральной линии, существующей в амплитудном спектре и являющейся неотъемлемым признаком Фано интерференции, экспериментально установлено еще одно её проявление на этот раз в фазовом спектре.

Руководитель - д.ф.м.н. А.А. Левченко

Результаты, полученные в рамках выполнения Госзадания по Программам РАН

19П. "Фундаментальные проблемы нелинейной динамики в математических и физических науках"; проект "Распространение поверхностных волн" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 12. Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Экспериментально исследованы нестационарные спектры капиллярной турбулентности на поверхности жидкого водорода при накачке гармонической силой. Впервые наблюдается накопление волновой энергии вблизи высокочастотной границы инерционного интервала (эффект «узкого горла»), что может быть вызвано конечностью диссипационного масштаба.

Слой жидкого водорода конденсируется между обкладками горизонтально расположенного плоского конденсатора. Диаметр цилиндрической ячейки с жидким водородом составляет 60 мм, глубина — 3.5-4 мм. Поверхность жидкости заряжается в присутствии постоянного электрического поля от источника бета-электронов. Волны на поверхности жидкости возбуждаются при приложении небольшого переменного напряжения дополнительно к постоянному напряжению. Капиллярные волны регистрируются путём измерения переменной составляющей мощности лазерного луча отражающегося от осциллирующей поверхности, что позволяет находить временную парную корреляционную функцию отклонения поверхности.

В проведённых экспериментах волны возбуждались гармонической силой, при этом в системе капиллярных волн формируется турбулентный каскад с спектром близким к спектру Колмогорова-Захарова. При повышении уровня накачки наблюдается развитие неустойчивости на половинной частоте накачки, что приводит к

появлению в спектре колебаний дополнительных гармоник, кратных половинной частоте, и соответствующей перестройке каскада. Во время перестройки каскада на высоких частотах наблюдается временное формирование локального максимума в спектре корреляционной функции, что можно интерпретировать как накопление волновой энергии в соответствующем частотном диапазоне. Локальный максимум наблюдается только в ограниченное время перестройки каскада и исчезает к моменту установления нового стационарного распределения.

Руководитель – д.ф.м.н. В.Б.Ефимов

2П. "Вещество при высоких плотностях энергии"; проект "Получение и исследование материалов при высоком давлении" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 9. Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Отработана методика капсулирования закаленных образцов гидридов в калориметрических ячейках, позволяющих проводить измерения теплоты распада с сохранением выделившегося водорода. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии в изотермическом режиме исследованы процессы распада гидридов никеля и хрома. Определены стандартные энтальпии образования гидрида никеля $\Delta H^\circ(298\text{ K}) \approx 16$ кДж/г-атом Н и хрома $\Delta H^\circ(298\text{ K}) \approx 55$ кДж/г-атом Н.

24П. "Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов"; проект "Межчастичные взаимодействия в электронных и экситонных системах" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 9. Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Подпрограмма I. Физика и технология наноструктур, наноэлектроника и диагностика

Разработана и реализована экспериментальная методика оптического возбуждения и детектирования циклотронных “spin-flip” магнитоэкситонов в режиме целочисленного квантового эффекта Холла при факторе заполнения $\nu=2$ в GaAs/AlGaAs легированной электронами гетероструктуре с одиночной широкой квантовой ямой (35 нм) и высокой подвижностью электронов ($\cong 10^7 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$). Найдено, что с помощью данной методики можно возбуждать до 15% магнитоэкситонов от полного числа исходных двумерных электронов на основном уровне Ландау (т.е. число триплетных магнитоэкситонов может достигать $\cong 10^{10} \text{ см}^{-2}$).

В новой высокоподвижной двумерной электронной системе в гетероструктурах MgZnO/ZnO исследованы циклотронный, плазменный и магнитоплазменный резонансы с помощью нового разработанного метода оптического детектирования резонансного микроволнового поглощения. Из зависимостей резонансных частот этих мод была определена циклотронная масса электронов и ее зависимость от концентрации электронов.

В квазидвумерном электронном газе в GaAs/AlGaAs гетроструктурах продемонстрировано обращение знака z-компоненты g-фактора электронов в сильном перпендикулярном магнитном поле вблизи $\nu=3$ по мере уменьшения ширины квантовой ямы. Показано, что вследствие обменного взаимодействия в электронной системе, энергетическое расщепление между спектральными компонентами с разной циркулярной поляризацией в окрестности фактора заполнения 3 проявляет максимум либо минимум как функция величины магнитного поля; конкретный тип экстремума определяется знаком z-компоненты электронного g-фактора.

В нанопроволоках InAs проведены измерения транспорта в присутствии сканирующего затвора (проводящей иглы атомно-силового микроскопа) при гелиевых температурах. Обнаружено, что на разных

образцах характерная змеевидная (slalom-like) модуляция сканов демонстрирует характерный шаг $\sim 250-300$ нм, что соответствует расстоянию, при котором кулоновская энергия электронов в системе оказывается порядка температуры. Этот факт указывает на возможность возникновения Вигнеровского кристалла в данной системе.

Исследовано зеемановское расщепление и поляризация экситон-поляритонной системы в планарных GaAs микрорезонаторах в широком диапазоне плотностей возбуждения, отвечающих режимам (i) поляритонной бозе-конденсации и (ii) фотонной генерации при плотности экситонов, превышающей порог их ионизации. Найдено, что в этих режимах эффект магнитного поля качественно различен, а именно: в режиме бозе-конденсации поляритонов наблюдается тушение расщепления Зеемана в малых магнитных полях со сменой знака g -фактора, а в режиме слабой связи происходит полное подавление зеемановского расщепления.

При помощи СТМ-СТС проведены исследования зарядового состояния отдельных молекул C₆₀ адсорбированных на поверхности WO₂/W(110). Показано, что молекулы C₆₀ могут быть в двух зарядовых состояниях – электронейтральные и отрицательно заряженные. Обнаружено переключение молекул C₆₀ адсорбированных на поверхности WO₂/W(110) между двумя состояниями – заряженной молекулой и нейтральной вблизи температуры вращательного фазового перехода.

Методами ДМЭ и СТМ проведены исследования условий формирования атомной структуры упорядоченных атомных структур на ступенчатых поверхностях Si(557), Si(556). Найдены режимы термообработки, которые позволяют получать на базе чистых поверхностей Si(hhm)-(7×7) регулярные системы ступеней с характерной периодичностью в нанометровом диапазоне. Продемонстрированы механизмы формирования низкоразмерных наноструктур Pb, Ag, Gd на vicинальных ступенчатых поверхностях Si(hhm).

Исследованы свойства усиления излучения из наноостровков с квантовыми точками CdSe в гетероструктурах ZnSe/CdSe/ZnSe, помещенных в щель металлических нано-антенн. Обнаружено, что при вариации длины прямолинейной наноантенны наблюдаются периодические осцилляции усиления интегральной интенсивности излучения квантовых точек. Установлено, что асимметрия антенны приводит к появлению к различию коэффициентов усиления в левой и правой циркулярных поляризациях фотовозбуждения, селективное усиление поляризованным светом является периодической функцией длины антенны.

Исследованы корреляционные функции первого порядка в экситон-поляритонном конденсате в GaAs микрорезонаторе при импульсном межзонном фотовозбуждении. Найдено, что длина когерентности r_c зависит как от плотности фотовозбуждения P , так и от размера возбуждающего пятна d_{pump} . При $d_{\text{pump}} \sim 20$ мкм r_c быстро растет после начала формирования конденсата и в течение ~ 15 пс достигает значений $r_c \sim d_{\text{con}} \sim 20$ мкм. При $d_{\text{pump}} \sim 40-50$ мкм r_c не превышает 10 мкм, что существенно меньше r_c при $d_{\text{pump}} \sim 20$ мкм. Такое поведение обусловлено одновременным зарождением конденсата в нескольких точках возбуждаемого пятна из-за наличия флуктуаций потенциала и большим временем установления фазы в поляритонном конденсате, превышающим время жизни поляритонов ~ 20 пс.

С целью исследования возможности управления спином экситонов в квантовых ямах с помощью контролируемой локализацией носителей с помощью эффекта Керра исследовано время жизни электронного спина в наноструктурах с GaAs квантовыми ямами, у которых на поверхности нанесены металлические мозаичные затворы. Установлено, что при приложении внешнего электрического смещения к мозаичным затворам можно контролируемо изменять время жизни электронного спина от нескольких сот пс до нескольких десятков нс.

Изучены особенности формирования СТМ-изображений поверхностей слоистых соединений (графит, силицид гадолиния, монотеллурид галлия) при использовании зондов с различной электронной структурой: монокристаллические алмазные и вольфрамовые зонды (W[001], W[111]), чистые и модифицированные атомом легкого элемента (кислорода) поликристаллические вольфрамовые зонды. Показано, что использование зондов с доминированием электронных p -орбиталей на острие позволяет достичь более высокого пространственного разрешения в диапазоне расстояний «зонд-образец» 2.5--5.0 Å, когда электронная структура иглы и поверхности не модифицирована взаимодействием.

Подпрограмма II. Наноматериалы

Для пористых электродов ТОТЭ проведено моделирование процессов переноса заряда с учетом реакции смены носителя заряда (на контактах ионный проводник – смешанный проводник) на поверхности обобщённого смешанного проводника. Разработана одномерная макромодель электрода. Установлено, что реакция смены носителя заряда сосредоточена в слое конечной толщины. Продемонстрировано существование оптимальной толщины электрода, при которой достигается минимальное сопротивление. Показано, что переход к наноразмерным пористым системам увеличивает эффективность электрода, одновременно уменьшая его оптимальную толщину, при этом полное сопротивление падает обратно пропорционально квадратному корню удельной площади поверхности электрода.

37П. "Физика высокого давления"; проект "Экспериментальные и теоретические исследования структуры и свойств фаз высокого давления" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 8. Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Парадокс превращения кальция при высоком давлении из плотноупакованных структур (кубической гранцентрированной и кубической объемцентрированной) в простую кубическую структуру с понижением компактности упаковки и координационного числа объяснен изменением валентно-электронного состояния. При сильном сжатии кальция происходит перекрытие внешнего $4s$ электронного уровня и уровня $3p$ электронного остова, что увеличивает число валентных электронов от 2 до 3–3.5. Такое изменение валентного состояния Ca приводит к стабилизации простой кубической структуры вследствие контакта уровня Ферми и плоскостей Бриллюэна (110) типа в соответствии с правилами Юм-Розери.

20П. "Квантовые мезоскопические и неупорядоченные структуры"; проект "Нанокристаллические и нанокластерные структуры и структуры на основе самоорганизации примесей и дефектов" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 8. Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Обнаружена сверхпроводимость при температуре $T_c = 19.5$ К в образцах металлооксидных смесей Cu/CuO_x , подвергнутых ударно-волновому сжатию до давлений 35 ГПа. На основании магнитометрических измерений, а также рентгенофазового и элементного анализа образцов установлено, что сверхпроводимость возникает в образованном ударно-волновым сжатием гранулированном пограничном слое (интерфейсе), разделяющем металлическую медь и ее оксид CuO_x .

Показано, что в новой двумерной электронной системе с тяжелой массой электронов, которая реализуется в гетероструктуре $MgZnO/ZnO$, двумерный электронный канал образуется не за счет легирования барьерного слоя донорной примесью, а за счет различной диэлектрической поляризации граничащих полупроводниковых материалов. В результате, в этих новых гетероструктурах высота барьера

и концентрация электронов оказываются пропорциональны друг другу, что радикально отличает этот случай от традиционных GaAs/AlGaAs гетероструктур.

Изготовлены и исследованы сверхпроводящие потоковые кубиты, которые используют джозефсоновские инверторы фазы на основе пи-контактов сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник. Продемонстрировано, что включение пи-контакта в сверхпроводящий контур кубита, фактически, смещает кубит в рабочую точку (точку вырождения) без приложения внешнего магнитного потока

Обнаружено проявление спин-орбитальной щели в Андреевском отражении электронов на границе раздела двумерной электронной системы, обладающей сильным спин-орбитальным взаимодействием, и сверхпроводящего контакта. Этот эффект, хорошо воспроизводимый на контактах разной прозрачности и разных сверхпроводниках, не нашел пока теоретического объяснения.

Изучено влияние полярности смектических наноплёнок на структуру и оптические свойства включений в наноплёнках. Показано, что полярность жидкокристаллической среды индуцирует самоорганизацию частиц в двумерные структуры. Реализовано изменение ориентации упорядоченных структур из частиц в плёнках в электрическом и магнитном поле.

Обнаружено переключение молекул C₆₀ адсорбированных на поверхности WO₂/W(110) между двумя состояниями – заряженной молекулой и нейтральной. Переключения наблюдались вблизи температуры вращательного фазового перехода. Показано, что переключение молекул коррелирует с изменением их ориентации

П.4 ОФН "Спиновые явления в твердотельных наноструктурах и спинтроника"; проект "Исследование коллективных спиновых возбуждений в квазидвумерных электронных и экситон-поляритонных системах" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 8. Актуальные

проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Экспериментально и теоретически исследованы гибридные структуры на основе сверхпроводников, нормальных металлов, ферромагнетиков и полупроводников. В структурах с инъекцией спин-поляризованных носителей в джозефсоновский барьер наблюдалась резкая экспоненциальная зависимость критического транспортного тока от тока инъекции, которая определяет возможность эффективно управлять джозефсоновскими характеристиками в таких триодных устройствах. В двухслойных тонкопленочных структурах ферромагнетик/сверхпроводник обнаружены эффекты памяти при перемагничивании ферромагнитного слоя, которые связаны с замораживанием определенной конфигурации вихрей Абрикосова в соседнем сверхпроводящем слое. Для двумерной гетероструктуры рассчитано оптическое проявление спин-орбитального взаимодействия, дающее возможность получать величину этого взаимодействия с помощью измерения амплитуды отражения и прохождения электромагнитной волны.

В спектрах резонансного отражения двумерной электронной системы впервые наблюдается линия Лафлиновской жидкости. Наблюдение отдельной линии Лафлиновской жидкости, помимо научной составляющей, имеет существенное методическое значение. Появляется непосредственная возможность оптического зондирования несжимаемых жидкостей в трансляционно симметричной двумерной системе (то, что не удавалось сделать до сих пор оптическими методиками и методами циклотронного и спинового резонанса), а также возможность изучения с помощью время-разрешенных оптических методов динамики релаксации спиновых и зарядовых возбуждений в Лафлиновских несжимаемых жидкостях.

Исследована релаксация спин-циклотронных экситонов при факторе заполнения $\nu=2$ с помощью методики резонансного отражения. Обнаружено два типа магнитоэкситонов: спиновой синглет с полным спином ноль и спиновой триплет с полным спином единица и проекциями спина на ось магнитного поля $-1, 0 +1$. Спиновой триплет, в отличие от спинового синглета, оптически не активен (темный экситон). В условиях, когда температура электронной системы много меньше энергетической щели между спин-синглетным и спин-триплетным экситоном единственным каналом релаксации в основное состояние является канал с испусканием высокочастотных акустических фононов в присутствии спин-орбитального взаимодействия, вероятность которого крайне низка, вследствие чего времена релаксации достигают сотен пс.

Исследовано влияние анизотропии поляритон-поляритонного взаимодействия на поляризационные свойства сигнала и холостого сигнала в стимулированном параметрическом рассеянии экситонных поляритонов при резонансном фотовозбуждении вблизи точки перегиба дисперсионной поляритонной кривой. Найдено, что вследствие расщепления в этой области квазиимпульсов поляритонной моды на ТЕ и ТМ моды спиновая анизотропия поляритон-поляритонного взаимодействия может приводить к поляризационной неустойчивости сигнала стимулированного поляритон-поляритонного рассеяния. Найдено, что переключение поляризации сигнала параметрического рассеяния с линейной на циркулярную происходит при соблюдении трех условий: (i) возбуждение светом с линейной поляризацией, параллельной поляризации верхней поляритонной моды, (ii) величина расщепления ТЕ и ТМ мод больше ширины поляритонных уровней и (iii) плотность возбуждения выше пороговой для бистабильного перехода.

ОФН.-П5. "Физика новых материалов и структур"; проект "Структура и свойства новых функциональных материалов" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 9. Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, метаматериалы, фтонные кристаллы, световоды для волоконно-оптических систем Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

С целью оптимизации анализа механизмов переноса и изучения процессов деградации твердоэлектролитных мембран ТОТЭ, исследованы электропроводности в интервале частот 1 Гц - 32 МГц монокристаллических материалов на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами иттрия и скандия в рабочих условиях ТОТЭ. В интервале концентраций стабилизирующих добавок 1-30 мол.% Y_2O_3 и 1-10 мол.% Sc_2O_3 максимум ионной проводимости достигается при со-допировании, когда основным допантом является Sc_2O_3 и концентрация Y_2O_3 выбирается минимально необходимой для получения кубической фазы (в частности, для отношения $Sc_2O_3:Y_2O_3$ на уровне 10:1). Анализ микротвердости показал отсутствие значимого влияния катионного состава монокристаллов на их механические свойства.

Методом фотолитографии аморфных пленок анодированного оксида ниобия изготовлены мезоскопические пленочные гетероструктуры и исследованы эффекты их резистивных переключений. Гетероструктур на основе аморфных пленок имеют слабо выраженный эффектом резистивных переключений. Отжиг переводит аморфный оксид ниобия в многофазное нанокристаллическое состояние и при этом эффект переключений (мемристорный эффект) становится ярко выраженным. Показано, что диодное поведение и существование бистабильных резистивных состояний в этих структурах обусловлены модуляцией барьера Шоттки, сформированного слоем оксида ниобия в интерфейсе металл-оксид.

Экспериментально исследовано влияние технологических параметров процесса получения кристаллических лент ZnSe на

критический радиус захвата микро-, субмикро- и нанопузырьков из расплава, а также на концентрацию и размеры образуемых ими пор и их распределение в ленте. Изучено заполнение пор парами компонентов расплава и имитаторами активных сред (CO, CH₄) (рис. 6). Показана возможность создания периодических структур микро- и нанопор в матрицах кристаллических халькогенидов металлов, а также заполнения их некоторыми активными средами, например, полярными газами.

Построены изобарное сечение диаграммы Si – C и изотермический разрез тройной системы Si – C – Ar. Проведен анализ условий зарождения и роста C-кластеров на основе диаграммы Si – C – Ar. Показано, что при малых градиентах состав пара над подложкой находится вблизи границы фазовых областей SiC+V and SiC+C+V.

Выращена партия слоев самосвязанных микрокристаллов карбида кремния на гибкой углеродной фольге, исследованы механизмы их формирования, структура и электрофизические свойства. Отработаны методики их консолидации с помощью дополнительной пропитки расплавленным кремнием тыльного слоя фольги. На основе полученных структур изготовлены высокотемпературные терморезисторы, чувствительность которых в 2,5 раза превышает этот показатель известных аналогов.

С использованием метода магнитооптической (МО) индикаторной пленки изучены моды перемагничивания в тонкопленочном ферромагнетике NiFeCuMo с периодически меняющимися в плоскости ФМ пленки однонаправленной анизотропией в участках, обменно-связанных с пленкой антиферромагнетика (АФМ) FeMn, выполненной в виде полос квадратной решетки, и одноосной анизотропией в участках внутри этой решетки. Показано, что сформировавшиеся вдоль краев этих полос границы, отделяющие ФМ участки с различающейся анизотропией, оказывают решающее влияние на кинетику преобразования доменной структуры в обоих типах ФМ участков.

ОФН-ПЗ. "Сильно коррелированные электроны в твердых телах и структурах"; проект "Переходы проводник-диэлектрик и сверхпроводник-диэлектрик в сильно коррелированных системах, склонных к зарядовому упорядочению" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 8. Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

Проведен анализ влияния сильного спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы на целочисленный квантовый эффект Холла, что позволило установить наличие сильного спин-орбитального взаимодействия в квантовых ямах InGaAs, оценить его величину, и наблюдать в месте контакта на краю квантовой ямы с сверхпроводником особенности андреевского отражения, на масштабе энергии спин-орбитального взаимодействия. Продемонстрирована возможность слияния квантовых уровней двумерной электронной системы, помещенной в квантующее магнитное поле, обусловленная сильным межэлектронным взаимодействием. Слияние квантовых уровней, в частности, возможно в кремниевых полевых структурах благодаря наличию в электронном спектре спинового и долинного расщеплений.

Изучена магнетолюминесценция в геометрии Фарадея пространственно-непрямых, дипольных экситонов в GaAs/AlGaAs квантовой яме шириной 25 нм при накапливании их в латеральной электростатической ловушке. Обнаружено, что величина критического магнитного поля B_c , ниже которой в центре ловушки спиновое (парамагнитное) расщепление линии люминесценции экситона на тяжелой дырке практически полностью скомпенсировано из-за обменного взаимодействия в плотном бозе-газе, линейно растет с экситонной концентрацией в качественном согласии с теорией].

В диоде Шоттки со структурой из двух узких гетерослоев, GaAs (3.5 нм) и AlAs (5 нм) в перпендикулярном магнитном поле с помощью внешнего перпендикулярного электрического поля получены времена

жизни дипольных экситонов до ~ 1 мкс и времена спиновой релаксации экситона, превышающие 1 мкс.

В исследованиях неравновесного токового шума в двумерном баллистическом контакте обнаружено отклонение шумовой температуры от Джонсон-Найквистовского значения в предположении теплопроводности Видемана-Франца вблизи контакта. На основе квантового сужения реализован нано-болометр для изучения неравновесных потоков энергии в квазиодномерном аналоге Латинжеровской жидкости

П1.1 ОФН "Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии"; проект "Нейтронные исследования гидридов высокого давления" (Раздел II. Физические науки. Подраздел 9. Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, метаматериалы, фтонные кристаллы, световоды для волоконно-оптических систем Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы)

При давлениях водорода и дейтерия 2.8–7.4 ГПа синтезированы образцы фаз высокого давления MgNi_2H_3 и MgNi_2D_3 и закалены до температуры жидкого азота. Закаленные образцы исследованы при атмосферном давлении методами рентгеновской дифракции, нейтронной дифракции и магнитометрии. Установлено, что изучавшиеся фазы имели ромбически искаженную подрешетку металла типа MgSi_2 (пространственная группа $Fm\bar{3}m$), и что в металлической подрешетке фазы MgNi_2D_3 атомы дейтерия занимали позиции с октаэдрической Mg_4Ni_2 (D1/4b) и планарной Ni_2 (D2/8f) координацией. Проведены *ab initio* расчеты динамической устойчивости структуры MgNi_2H_3 при $T = 0$ К в рамках теории функционала плотности.

В 2014 году сотрудниками ИФТТ РАН защищены одна докторская и 5 кандидатских диссертаций:

1. Синицын Виталий Виталиевич «Динамический и статический беспорядок в твердых телах при высоком давлении» - докторская диссертация по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» (диссертационный совет Д 501.002.01 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова), г. Москва
2. Орлов Алексей Дмитриевич «Исследование процесса направленной кристаллизации сплавов эвтектического состава» кандидатская диссертация по специальности 01.04.10 - «физика конденсированного состояния» (диссертационный совет Д212.132.08 при НИТУ «МИСИС»), г. Москва
3. Филатов Евгений Васильевич «Кинетика релаксации носителей в фотовозбужденных гетероструктурах 2-го типа» - кандидатская диссертация по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» (диссертационный совет Д 002.100.01 при ИФТТ РАН), г. Черноголовка
4. Шашков Иван Владимирович " Экспериментальное изучение коллективных процессов при пластической деформации кристаллов и перемагничивании гетерофазных магнетиков" кандидатская диссертация по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» (диссертационный совет Д 002.100.01 при ИФТТ РАН), г. Черноголовка
5. Орлова Надежда Николаевна «Влияние механических напряжений на структуру, фазовые превращения и свойства аморфных сплавов» " кандидатская диссертация по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» (диссертационный совет Д 002.100.01 при ИФТТ РАН), г. Черноголовка
6. Голикова Татьяна Евгеньевна «Эффект близости и когерентные явления в гибридных структурах сверхпроводник-нормальный металл-ферромагнетик» кандидатская диссертация по специальности 01.04.07 –

«Физика конденсированного состояния» (диссертационный совет Д 002.100.01 при ИФТТ РАН), г. Черноголовка

Штатное состояние на 31 декабря 2014 г.

Количество сотрудников	2013 год	2014 год
Сотрудники ИФТТ	476	467
Совместители	34	33
в том числе научные сотрудники	8	10
Научные сотрудники	209	209
в том числе:		
доктора наук	56	55
кандидаты наук	111	109
Молодые специалисты, принятые в ИФТТ	2	5

Финансирование на 31 декабря 2014 года в тыс. руб.

Доходы за 12 месяцев, всего (тыс. руб.)	392880	100%
Бюджетное финансирование: Госзадание	217725.90	55.4
Программы РАН	20155	5.1
Целевые ФАНО	25923.6	6.6
РФФИ	55354.32	14.1
Миннауки (субсидии на грант)	9700	2.5
Финансирование из РНФ	20000	5.1
Получено по хоздоговорам	32362.88	8.2
Получено по международным контрактам	3059.95	0.8
Получено по коммерческой деятельности	3181.25	0.8
Аренда	5417.50	1.4

Расходы за 12 месяцев, всего	394672	100%
Заработная плата	182145.87	46.1
Начисления на заработную плату	50610.95	12.8
Выплаты из ФМП	753.70	0.2
Коммунальные платежи	21289.30	5.4
Научная работа (материалы, приборы и т.п.)	65826.94	16.7
Прочие расходы (канц., связь, ремонт)	73513.04	18.7
Оборудование	532.20	0.1

Индикаторы эффективности

Индикатор	Единицы измерения	2014	
		план	Фактическое исполнение
1	2	3	4
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации Программы	единиц	171	214
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science)	единиц		189
Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей	%	36.8	36.8
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: Зарегистрированных патентов в России Зарегистрированных патентов за рубежом	Единиц		9 0
Внутренние затраты на исследования и разработки (на одного исследователя)	Тыс. руб.		1232,5 тыс. руб.