

Жукова Елена Сергеевна

**Оптическая спектроскопия наноразмерных эффектов  
в электронно-коррелированных материалах**

01.04.07. – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук **Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН** на кафедре Московского физико-технического института (государственного университета) «**Физика микроволн и наноматериалов**»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией ИОФ РАН  
**Горшунов Борис Петрович**

Консультант

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник ИОФ РАН  
**Прохоров Анатолий Семенович**

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ФИАН  
**Лобанов Андрей Николаевич**

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией ИОФ РАН  
**Ельцов Константин Николаевич**

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук  
Институт спектроскопии

Защита состоится «23» июня 2010 г. в \_\_\_ час \_\_\_ мин на заседании диссертационного совета Д 212.156.06 при Московском физико-техническом институте (государственном университете) по адресу: 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, корп. В-2.

Отзывы направлять по адресу: 141700 г. Долгопрудный, Московская обл.,  
Институтский переулок, д. 9, МФТИ, Диссертационный совет Д **212.156.06**

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МФТИ

Автореферат разослан «\_\_» мая 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.156.06 МФТИ:

кандидат технических наук, доцент  
**Н.П. Чубинский**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время пристальное внимание исследователей уделяется физическим явлениям, происходящим на наномасштабных расстояниях. Это обусловлено, с одной стороны, активным применением наноразмерных объектов и эффектов в самых различных областях науки и техники – в микроэлектронных технологиях, биоинженерии, медицине, химии, физике и многих других. С другой стороны, наномасштабные явления, носящие принципиально квантовый характер и нехарактерные для макромира, представляют несомненный фундаментальный интерес и способствуют развитию новых научных концепций. Особо интересными, как для экспериментаторов, так и для теоретиков, представляются наноразмерные особенности в проводящих материалах и возможность контролировать такие особенности не только внешними воздействиями (температура, давление, магнитное и электрическое поле), но также и за счет трансформаций структуры объектов. Так, при наноструктурировании кардинальное изменение может претерпевать такая фундаментальная характеристика проводника, как энергетический спектр его электронной подсистемы, что может приводить к появлению щелевых особенностей в электронном спектре или даже к переходу материала из проводящего состояния в диэлектрическое.

Наноразмерные явления в проводниках приобретают дополнительное многообразие, если носители тока в них оказываются коррелированными, т.е. сильно взаимодействующими между собой. Межэлектронные корреляции порождают массу ярких физических явлений, таких, например, как высокотемпературная сверхпроводимость, колоссальное магнетосопротивление или тяжёлые фермионы. В подобных материалах необходимость рассмотрения эффектов, происходящих на наномасштабах, обусловлена двумя факторами. Так, сама природа многочастичных взаимодействий может быть причиной возникновения в объекте пространственных областей с различными физическими свойствами, имеющими протяжённость от нескольких нанометров до десятков и сотен нанометров. Особенности поведения таких нанокластеров и их окружения и формируют самосогласованным образом физические свойства системы в целом. В качестве примеров можно привести фазовое расслоение и страйпы в манганитах [1], страйповую структуру в сверхпроводящих купратах и пниктидах железа [2], возникновение ферромагнитных кластеров в концентрированных интерметаллических растворах [3], сверхпроводимость в фуллеренах [4]. Кроме того, *искусственная* структуризация объектов также может качественно изменять их свойства. Например, в нанопористом кремнии реализуются условия для фотолюминесценции в

видимой области спектра [5]; с уменьшением размеров кристаллитов до нескольких десятков нанометров антиферромагнитное состояние манганитов трансформируется в ферромагнитное [6]; свойства тонких сверхпроводящих плёнок могут существенно отличаться от свойств массивного материала [7].

Исследования проводящих материалов, в которых одновременно проявляются и корреляционные, и наноразмерные эффекты, является одним из наиболее многообещающих и перспективных направлений современной физики. В экспериментальном отношении, среди наиболее мощных методов исследования проводников находится оптическая спектроскопия, позволяющая напрямую зондировать электронную подсистему и получать такие её фундаментальные параметры, как концентрация, подвижность, частота релаксации, плазменная частота, щелевые особенности в энергетическом спектре. Поскольку электронно-коррелированные состояния характеризуются относительно малыми энергиями - порядка долей электронвольта или единиц миллиэлектронвольт [8, 9], то соответствующие особенности, обусловленные многочастичными и наноразмерными эффектами, должны располагаться в оптических спектрах в дальней инфракрасной (ИК) или ещё более низкочастотной области – терагерцовой (ТГц). Известно, что ТГц область (частоты  $10^{11}$  -  $10^{12}$  Гц) является труднодоступной для проведения измерений с помощью стандартных методик. Как результат, надёжных экспериментальных данных по оптическим свойствам проводников с электронными корреляциями и соответствующими наноразмерными эффектами на ТГц частотах в литературе практически нет. Этим определяется *актуальность* настоящей работы, в рамках которой были выполнены первые систематические измерения терагерцовых спектров ряда материалов, в которых коллективное поведение делокализованных электронов оказывается связанным с наномасштабными эффектами. Это наноструктурированные манганиты состава  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ , твердые растворы  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  с ферромагнитными кластерами и полупроводниковые структуры: нанопористый кремний и гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками. Измерения ТГц-спектров выполнялись на ЛОВ-спектрометре, разработанном в Институте общей физики и обеспечивающем количественные измерения оптических спектров материалов в диапазоне 0.03 – 1.25 ТГц [9] (ЛОВ-лампа обратной волны, генератор ТГц излучения). С целью наиболее полной и детальной характеристики параметров электронной подсистемы в исследуемых объектах, помимо ЛОВ-спектрометра были использованы стандартные инфракрасный Фурье-спектрометр и оптический эллипсометр. Это позволило перекрыть чрезвычайно широкий интервал частот (энергий), от нескольких обратных сантиметров (долей миллиэлектронвольта) до  $33\,000\text{ см}^{-1}$  ( $\approx 4\text{ эВ}$ ).

Практически для всех образцов оптические измерения были выполнены впервые.

### **Цель работы**

Целью работы было изучение методами оптической спектроскопии наноразмерных эффектов в твердых телах с электронными корреляциями на примере наноструктурированных поликристаллических манганитов состава  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ , кластеризованных твердых растворов  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ , а также полупроводниковых структур нанопористого кремния и гетероструктур «германий/кремний» (Ge/Si) с квантовыми точками германия.

В связи с этим были поставлены следующие **задачи**:

- С применением модели эффективной среды Максвелла-Гарнета разработать и программно реализовать методику обработки оптических спектров многослойных систем, компоненты которых представляют собой гетерогенные среды.
- Изучить влияние наноструктурирования на электронные свойства манганитов состава  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  с целью исследования механизмов фазовых переходов, приводящих к установлению магнитного и зарядового упорядочений.
- Исследовать влияние ферромагнитных кластеров ионов железа на электронные свойства концентрированных интерметаллических растворов  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ .
- Исследовать спектр энергетических состояний электронов проводимости, участвующих в обменном взаимодействии Рудермана-Киттеля-Касуи-Иосиды (РККИ) в разбавленных растворах  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  в фазе спинового стекла.
- Определить характеристики носителей тока в кремниевых нанокристаллитах в **нанопористом кремнии** и исследовать природу их отличия от соответствующих характеристик «массивного» кремния.
- Исследовать диэлектрические свойства массива квантовых точек Ge в **гетероструктурах Ge/Si** в зависимости от технологического параметра – количества осажденного германия.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. В поликристаллических манганитах в фазе с зарядовым упорядочением обнаружены низкоэнергетические ( $\leq 10$  мэВ) полосы поглощения, которые полностью подавляются в наноструктурированных образцах. Показано, что природа полос не связана с коллективным откликом упорядоченной фазы, а

обусловлена акустическими фононами, которые становятся оптически активным при свертывании зоны Бриллюэна вследствие структурного фазового перехода.

2. В концентрированных ( $x \leq 22$  ат.%) твердых растворах  $Au_{1-x}Fe_x$  обнаружены эффекты локализации носителей заряда в наноразмерных ферромагнитноупорядоченных кластерах железа.
3. В спин-стекольной фазе разбавленных твердых растворов  $Au_{1-x}Fe_x$  ( $x = 6$  ат.%) обнаружена щель подвижности в энергетическом спектре электронов проводимости и показано, что она возникает вследствие вовлечения электронов в обменное взаимодействие РККИ между магнитными центрами Fe.
4. Определены диэлектрические характеристики отдельных нанокристаллитов в нанопористом кремнии и обнаружено их существенное отличие от соответствующих характеристик кристаллического «массивного» кремния. Показано, что отличия определяются эффектами локализации носителей внутри нанокристаллитов и квантовыми размерными эффектами.
5. В гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками Ge обнаружено существенное увеличение эффективной проводимости массива квантовых точек Ge по сравнению с проводимостью кристаллического «массивного» германия. Предложен механизм возрастания проводимости, основанный на учёте диффузии носителей тока из кремниевых подложек в слои с квантовыми точками германия.

### **Практическая значимость работы**

Полученные в работе результаты способствуют дальнейшему развитию представлений об эффектах, в том числе наноразмерных, происходящих в системах с сильными электронными корреляциями и могут оказаться полезными при разработке и создании новых материалов и приборов. Так, обнаруженное влияние наноразмерных эффектов на электронные свойства манганитов, твёрдых растворов  $Au_{1-x}Fe_x$  и полупроводниковых структур на основе кремния и германия дает в руки исследователей и инженеров эффективный инструмент для получения материалов с наперед заданными новыми характеристиками.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В поликристаллах  $La_{0.25}Ca_{0.75}MnO_3$  в зарядовоупорядоченной фазе обнаружены низкоэнергетические (около 5 мэВ и 10 мэВ) возбуждения и установлено, что они не являются коллективными зарядовыми возбуждениями, а обусловлены откликом акустических фононов, оптически активированных благодаря свертыванию зоны Бриллюэна вследствие структурного фазового перехода.

2. Обнаружено подавление низкоэнергетических возбуждений в образцах  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  при уменьшении размеров кристаллитов от 2000 нм до 40 нм. Показано, что подавление свидетельствует о слабой связи магнитного и зарядового упорядочений с динамикой кристаллической решетки.
3. В концентрированных растворах  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  с концентрациями железа  $x \leq 22$  ат.% на оптических частотах обнаружена резонансная линия поглощения. Показано, что природа линии и связана с локализацией носителей заряда в наноразмерных ферромагнитноупорядоченных кластерах железа
4. В разбавленном растворе  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x = 6$  ат.%) обнаружено уменьшение динамической проводимости на частотах ниже  $30 \text{ см}^{-1}$  при переходе в фазу спинового стекла. Показано, что обнаруженная особенность связана с возникновением щели подвижности в энергетическом спектре электронов проводимости за счёт их вовлечения в межпримесное РККИ-взаимодействие.
5. Для образцов нанопористого кремния установлено, что диэлектрические свойства нанокристаллитов существенно отличаются от свойств «массивного» кремния. Показано, что отличия обусловлены квантоворазмерным эффектом и локализацией носителей тока внутри кристаллитов.
6. В гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками германия впервые измерена эффективная проводимость массива квантовых точек и обнаружено, что она на несколько порядков величины превышает проводимость «массивного» германия. Предложен механизм возрастания проводимости, основанный на учёте диффузии носителей тока из кремниевых подложек в слои с квантовыми точками германия.

#### **Личный вклад**

Все результаты, представленные в работе, получены диссертантом лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИОФ им. А.М.Прохорова РАН и Штутгартского университета (Германия), а также на следующих всероссийских и международных конференциях: Молодёжная конференция «Физика и прогресс» (14 – 16 ноября 2007, Санкт-Петербург); 50-я Юбилейная Научная конференция МФТИ (23-27 ноября 2007, Долгопрудный); Конференция по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению. (Посвящается 50-летию ядерного реактора ИРТ) (26-30 ноября 2007, Москва); «Кремний-2008» V Международная конференция и IV школа молодых ученых и специалистов по актуальным

проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе (1-4 июля 2008, Черноголовка); Российское совещание по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2008» (19-23 августа 2008, Новосибирск); International Workshop Nonequilibrium Nanostructures (Nonna08) (December 01 - 06, 2008, Dresden, Germany); Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (25-30 мая 2009, Московская обл., пансионат «Университетский»); XXXV Совещание по физике низких температур (29 сентября – 2 октября 2009, Черноголовка); 52-я Научная конференция МФТИ (27-30 ноября 2009, Долгопрудный).

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах в научных журналах и доложены на 18 научных конференциях.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 133 страницы, включая 63 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 203 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, обозначены основные задачи исследования, определена научная и практическая значимость работы.

В **Первой главе** представлен обзор современного состояния исследований по теме диссертации, отдельно по каждому классу исследованных в работе объектов.

В **п. 1.1** описаны основные свойства редкоземельных манганитов  $R_{1-x}A_xMnO_3$  с частичным замещением атома редкой земли R щелочноземельным элементом А. Наиболее известной особенностью манганитов является эффект колоссального магнетосопротивления, который наблюдается в составах с  $x < 0.5$  и может достигать огромных величин порядка  $10^5\%$  при достаточно высоких температурах ( $T \sim 100$  К). [10]. В данном параграфе описаны особенности структуры кристаллической решетки, магнитные и транспортные свойства манганитов состава  $La_{0.25}Ca_{0.75}MnO_3$ , исследованных в настоящей работе. Для такого состава характерны эффекты зарядового (charge order - CO), магнитного и орбитального упорядочений, происходящих в условиях активной конкуренции соответствующих параметров порядка [11]. Такая конкуренция приводит к многообразию видов основного состояния манганитов и богатой фазовой диаграмме [1,



11]. Обсуждаются существующие теоретические подходы, которые в той или иной степени корректно описывают механизмы фазовых превращений и микроскопику основного состояния. Описывается обнаруженное относительно недавно влияние наноструктурирования на свойства манганитов [6, 12], когда вследствие поверхностных эффектов антиферромагнитное состояние образцов трансформируется в ферромагнитное. Отмечается, что хотя такое влияние несёт важную информацию о фундаментальных физических свойствах манганитов, достаточно подробно оно изучено лишь в отношении их магнитных характеристик.

**В п. 1.2** отмечены наиболее яркие физические явления, происходящие как в концентрированных интерметаллических твёрдых растворах магнитных ионов в немагнитной матрице, так и в фазе спинового стекла, возникающей в достаточно разбавленных составах. К характерным свойствам спиновых стёкол относятся наличие излома на температурной зависимости магнитной восприимчивости при температуре замерзания  $T_f$  [13], наблюдающегося одновременно с отсутствием резких аномалий при  $T_f$  удельной теплоемкости [14], наличие магнитной памяти и особенностей в поведении низкотемпературного сопротивления [15]. Обсуждаются механизмы взаимодействий магнитных моментов при увеличении концентрации магнитных примесей и переходе в состояние, характеризующее образование ферромагнитных нанокластеров [16]. Отмечается, что, несмотря на богатый набор специфических свойств разбавленных и концентрированных интерметаллических растворов с магнитными примесями, оптические исследования таких объектов ранее не проводились.

**В п. 1.3** приводятся сведения о существующих на сегодня материалах кремниевой индустрии и, в частности, о перспективах использования полупроводниковых структур на основе нанопористого кремния в приборах микро- и оптоэлектроники [17]. Отмечается наличие у нанопористого кремния интенсивной фотолюминесценции в видимой области спектра, зависящей главным образом от истории приготовления образца [5]. Приводятся данные по исследованию свойств нанопористого кремния в оптическом диапазоне частот, полученные методами комбинационного рассеяния света и инфракрасной спектроскопии.

**П. 1.4** посвящён описанию технологии выращивания и механизма формирования массивов квантовых точек германия в многослойных гетероструктурах «германий/кремний», Ge/Si [18]. Приводятся сведения, имеющиеся в литературе, относительно применения подобного рода структур в кремниевой оптоэлектронной технологии, а также описываются характерные для таких материалов фотолюминесцентные свойства.

**Вторая глава.** Во второй главе описаны методики измерения оптических спектров материалов, использованные при выполнении настоящей работы. Здесь же изложены теоретические основы моделей обработки экспериментальных данных.

При измерениях применялись три типа спектрометров: квазиоптический терагерцовый ЛОВ-спектрометр [9], инфракрасный Фурье-спектрометр типа Bruker IFS113V и оптический эллипсометр типа VASE фирмы J.A. Woollam Co. В п. 2.1 описаны основные принципы действия и схемы измерений на ЛОВ-спектрометре. Его важным достоинством является возможность *прямых* измерений терагерцовых спектров проводимости  $\sigma(\nu)$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(\nu)$ , что достигается при измерении спектров комплексного коэффициента пропускания (амплитуды  $\text{Tr}(\nu)$  и фазы  $\phi(\nu)$ ) плоских образцов. При необходимости производится также измерение спектров коэффициента отражения  $R(\nu)$ . В п. 2.2 и 2.3 коротко описаны стандартные Фурье-спектрометр и оптический эллипсометр. Конечный продукт измерений в виде спектров диэлектрических характеристик образцов,  $\sigma(\nu)$  и  $\epsilon(\nu)$ , получается путём обработки измеряемых в эксперименте спектров коэффициентов пропускания  $\text{Tr}(\nu)$ , отражения  $R(\nu)$  и фазового сдвига  $\phi(\nu)$  (п. 2.4). Поскольку все образцы представляли собой слоистые структуры, при анализе использовались стандартные френелевские формулы для плоско-параллельных сред. Разработанные нами ранее соответствующие процедуры [9] в настоящей работе были доработаны и усовершенствованы в двух отношениях. Во-первых, была реализована программно возможность определения диэлектрических спектров образцов с много бóльшим количеством слоёв по сравнению со стандартными ситуациями, описанными в [9]. Так, в случае гетероструктур «германий/кремний» количество слоёв достигало 13. Во-вторых, также программно была реализована возможность определения диэлектрических и геометрических параметров гетерогенных сред, входящих в виде слоёв в состав многослойных структур и представляющих собой наноразмерные включения одного материала в матрицу другого (п. 2.4). При этом для моделирования оптического отклика таких сред использовались модели эффективной диэлектрической функции оптического отклика и модель эффективной среды Максвелла-Гарнета.

В **третьей главе** изложены основные экспериментальные результаты, полученные для наноструктурированных манганитов состава  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  с размерами гранул 40, 85, 150, 200, 1000 и 2000 нм. В п. 3.1 описаны процессы синтеза образцов и их характеристики методами рентгеновского анализа и электронной микроскопии (Field Emission Scanning Electron Microscopy, FESEM). П. 3.2 посвящён собственно оригинальным экспериментальным результатам, полученным на основе анализа спектров проводимости и диэлектрической проницаемости  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . В спектрах  $\sigma(\nu)$  и  $\epsilon(\nu)$ ,

приведенных на Рис. 1а, б, в фазе с зарядовым упорядочением ( $T < T_{CO} \approx 140$  К) для образцов с размерами гранул 1 – 2 мкм (поликристаллические образцы) отчетливо видно

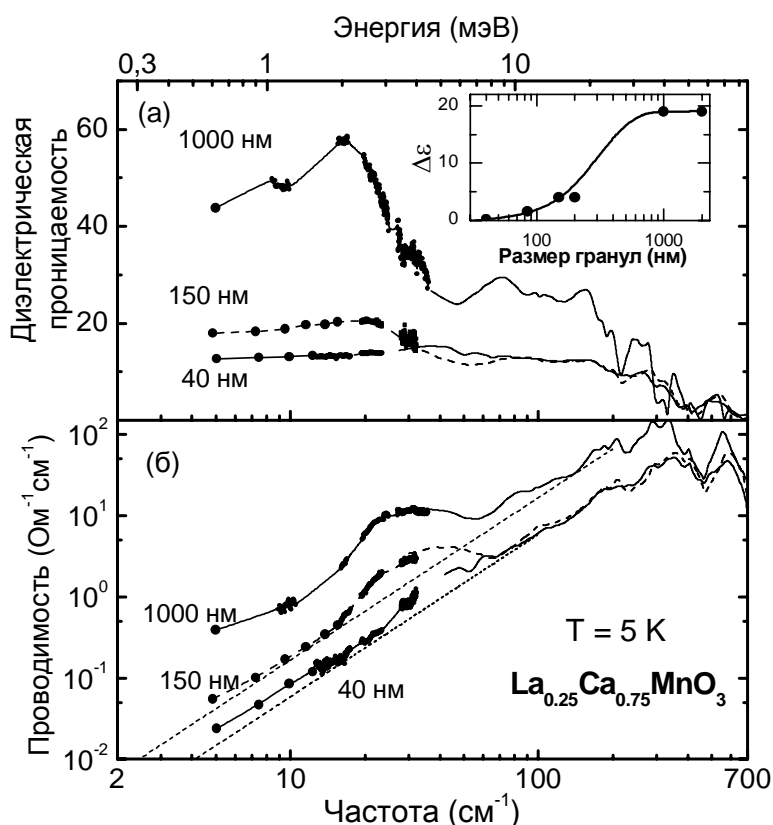


Рис.1. Спектры диэлектрической проницаемости и проводимости поликристаллического (кристаллиты 1000 нм) и наноструктурированных образцов  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . Прямой пунктирной линией показано квадратичное по частоте поведение, отвечающее низкочастотным «хвостам» фононов в ИК-области. Вставка: зависимость диэлектрического вклада полосы поглощения в районе  $30 \text{ cm}^{-1}$  от размера кристаллитов.

последние несколько лет. Однако, выполненные в данной работе детальные исследования температурного поведения низкоэнергетических полос поглощения (около  $30 \text{ cm}^{-1}$  и в районе  $80 - 100 \text{ cm}^{-1}$ , см. Рис. 1) в наноструктурированных образцах показали, что их природа никак не может быть связана с появлением ВЗП. В работе показывается, что происхождение наблюдаемых возбуждений более тривиально и обусловлено акустическими фононами, приобретающими оптическую активность вследствие происходящего в  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  при  $T = T_{CO} \approx 140$  К структурного фазового перехода с учетверением периода кристаллической решетки в направлении  $a$ . Возникновение сверхструктуры в кристаллической решётке приводит к свёртыванию зоны Бриллюэна, как показано на Рис. 2, из которого видно, что полоса на частотах  $20 - 40 \text{ cm}^{-1}$  отвечает акустическим модам, имевшим волновой вектор  $\mathbf{q} = \pi/4\mathbf{a}$ , а полоса на частотах  $80 - 100 \text{ cm}^{-1}$  связана с группой мод с волновым вектором  $\mathbf{q} = \pi/2\mathbf{a}$ . При такой интерпретации

возбуждение в виде низкочастотной (около  $30 \text{ cm}^{-1}$ ) полосы поглощения [A8 – A9, B16,]. Детальный анализ показывает, что полоса состоит из двух линий с собственными частотами около  $25 \text{ cm}^{-1}$  и  $38 \text{ cm}^{-1}$ . Похожее поглощение в  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  наблюдалось в работе [19], причём его природа связывалась с возникновением основного состояния типа Пайерлса-Фрëлиха с волной зарядовой плотности (ВЗП). Идея о том, что движущей силой СО-фазового перехода в манганитах может быть взаимодействие типа Пайерлса-Фрëлиха, довольно интенсивно обсуждается

обнаруженное исчезновение возбуждений в наноструктурированных образцах (вставка на Рис. 1а) говорит о том, что в наноразмерных образцах происходит полное подавление 4а-сверхструктуры в кристаллической решётке  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . В то же время, согласно данным магнитных измерений [6], зарядовое и магнитное упорядочения в наноструктурированных образцах  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  не исчезают, а лишь ослабевают. Это свидетельствует о том, что динамика кристаллической решётки не играет решающей роли в стабилизации зарядового и магнитного порядков. В п. 3.3 обсуждается температурное поведение диэлектрических спектров поликристаллических образцов  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . При этом основное внимание уделяется низкотемпературному ( $T < T_{\text{CO}}$ ) и наиболее низкочастотному ( $\nu < 10 \text{ см}^{-1}$ ) отклику, имеющему ярко выраженный релаксационный характер. Анализ спектров  $\sigma(\nu)$  и  $\epsilon(\nu)$  с применением модели Дебая, показывает, что релаксационная дисперсия  $\sigma(\nu)$  и  $\epsilon(\nu)$  не может быть объяснена размерными эффектами – локализацией зарядов внутри наноразмерных гранул, а является внутренним свойством зарядовой подсистемы и, возможно, связана с механизмом фазового перехода в CO-состояние, который может иметь признаки перехода типа «порядок-беспорядок».

**Четвертая глава** посвящена изложению результатов, полученных для кластеризованных и некластеризованных растворов  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ . В п. 4.1 охарактеризованы исследованные образцы, которые представляли собой высококачественные тонкие пленки  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  с концентрациями железа 0, 6, 17 и 22 ат.%, нанесенные на подложки высокоомного кремния. Качество пленок проверялось методами обратного рассеяния

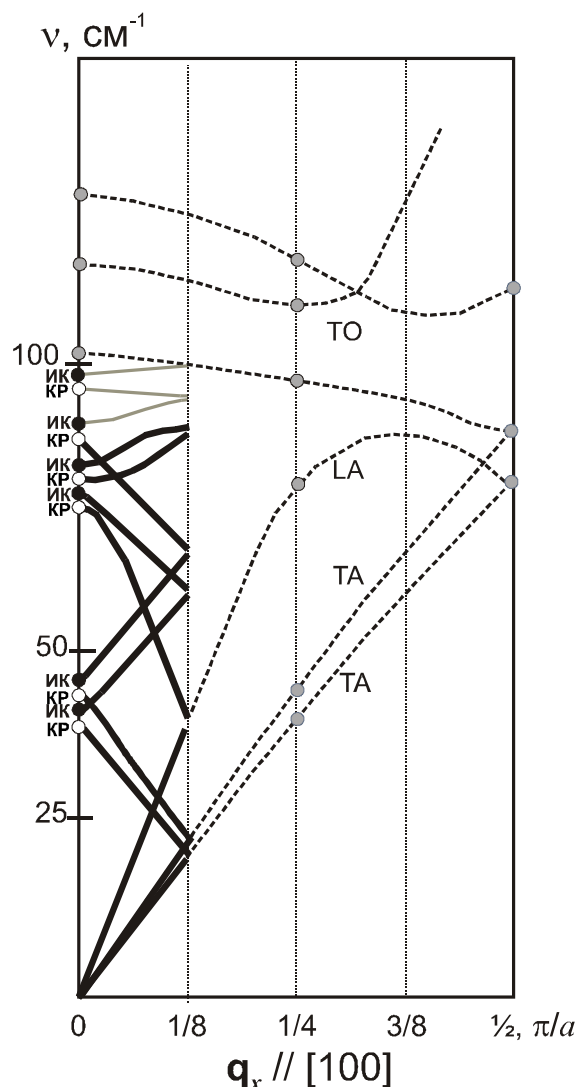


Рис.2. Схема «свёртывания» (folding) зоны Бриллюэна и переброса акустических фононных ветвей в центр зоны при структурном фазовом переходе с учетверением периода решётки в направлении  $a$ . Открытыми и заполненными кружками обозначены ИК- и КР-активные колебания, соответственно.

заряженных частиц (Rutherford backscattering spectrometry, RBS) и электроннозондового микроанализа (Electron probe micro-analyzer, EPMA). Все параметры плёнок не отличались от параметров «массивных» образцов аналогичных составов.

Результаты по оптическим измерениям  $Au_{1-x}Fe_x$  при комнатной температуре представлены в п. 4.2, где обсуждаются особенности спектров динамической

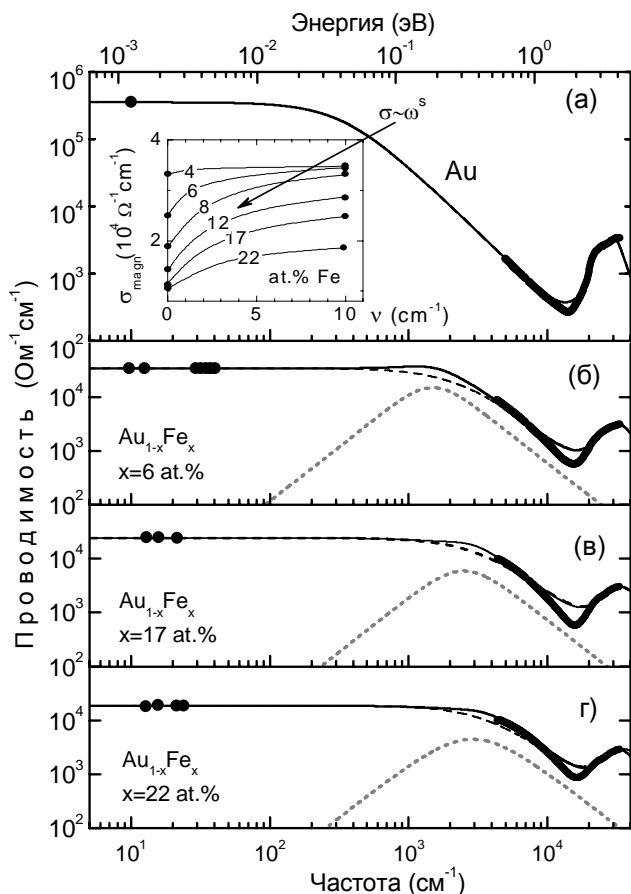


Рис.3. Спектры проводимости плёнок  $Au_{1-x}Fe_x$ ,  $x = 0$  (а),  $x = 6$  ат.% (б),  $17$  ат.% (в) и  $22$  ат.% (г) (точки и толстые линии). Пунктирные линии соответствуют обработке спектров коэффициента отражения с применением модели проводимости Друде, тонкие линии - с применением модели Друде и Лорентциана. Вклад Лорентциана показан отдельно точечной линией. На вставке показан магнитный вклад в проводимость  $\sigma_{magn} = \sigma_{meas} - \sigma_{Au}$  ( $\sigma_{meas}$  – измеренная проводимость,  $\sigma_{Au}$  – проводимость чистого золота) в статике и на частоте  $10 \text{ см}^{-1}$ .

проводимости *концентрированных* ( $x \leq 22$  ат.%) растворов  $Au_{1-x}Fe_x$  в интервале частот  $10 - 33\,000 \text{ см}^{-1}$ . Известно, что для таких составов характерно образование наноразмерных кластеров с ферромагнитноупорядоченными ионами железа. На Рис. 3 представлены полученные спектры проводимости для плёнок чистого золота (Рис. 3а) и плёнок с  $x=6$  ат.%,  $17$  ат.% и  $22$  ат.% (Рис. 3б, в, г, соответственно). Спектры для чистого золота, Au, хорошо описываются с использованием модели металлической проводимости Друде. В то же время, для составов  $Au_{1-x}Fe_x$ ,  $x \neq 0$ , на частотах  $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-1}$  в спектрах  $\sigma(\nu)$  видны существенные отличия (отметим логарифмический масштаб по вертикальной оси) от друдеской зависимости, которые свидетельствуют о наличии резонансного поглощения с собственной частотой в районе  $2000 - 3000 \text{ см}^{-1}$ . Вклад от этого дополнительного поглощения представлен отдельно пунктирными серыми линиями на Рис. 3. Помимо этого высокочастотного резонансного поглощения в работе были обнаружены особенности и в низкочастотных спектрах проводимости  $Au_{1-x}Fe_x$ . На вставке к Рис. 3а показано сравнение магнитного вклада в проводимость ( $\sigma_{magn}^{ac}$ ) на частоте  $10 \text{ см}^{-1}$

и в статике ( $\sigma_{magn}^{dc}$ ). Как видно, при малых концентрациях  $x$  железа обе величины практически совпадают,  $\sigma_{magn}^{ac} \approx \sigma_{magn}^{dc}$ , в то время как с ростом  $x$  наблюдается всё более возрастающее различие между ними, причём  $\sigma_{magn}^{dc} < \sigma_{magn}^{ac}$ , т.е. наблюдается поведение, сходное с поведением моттовского типа  $\sigma \sim \nu^s$ , где  $s \approx 1$ . В работе установлено, что обе обнаруженные особенности - различие статического и динамического вкладов в проводимость  $\sigma_{magn}^{dc} < \sigma_{magn}^{ac}$  и наличие резонансной полосы поглощения в районе 2000 – 3000  $\text{см}^{-1}$  – связаны с локализацией электронов проводимости внутри наноразмерных ферромагнитных кластеров железа [А6, А7, Б11, Б17, Б18]. Анализ показывает, что для концентрации железа 22 ат.% локализованными оказываются порядка 50% электронов проводимости.

В п.4.3 рассматриваются результаты, полученные для *разбавленных* растворов  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ , в которых нанокластеризация менее выражена, и в которых при низких температурах осуществляется переход в фазу спинового стекла, «спровоцированный» обменным РККИ-взаимодействием между ионами железа через посредство электронов проводимости. На Рис. 4 приведена температурная зависимость терагерцовых спектров проводимости  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  при  $x = 6$  ат.%. Видно, что при

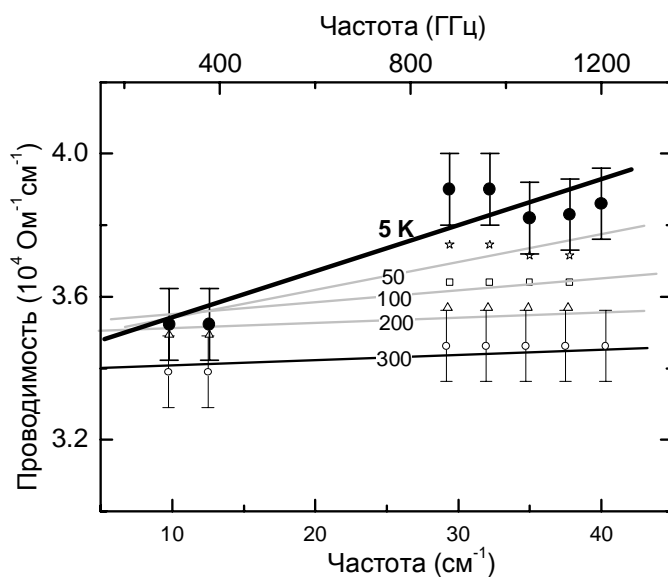


Рис.4. Частотные зависимости проводимости пленки  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ ,  $x = 6$  ат%, измеренные при различных температурах. Сплошные вспомогательные линии демонстрируют, что при температурах ниже 100 К появляется зависимость проводимости от частоты.

комнатной температуре проводимость практически не зависит от частоты - типичный признак друдеской проводимости металлического типа в пределе низких частот. При понижении температуры проводимость обнаруживает значительную дисперсию, причём именно при переходе в спинстекольную фазу, при  $T < T_f$  (для  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$   $T_f \approx 25$  К) и на частотах, как раз соответствующих энергии РККИ-взаимодействия (для  $\Delta_{\text{RKKY}} \approx k_B T_f \approx 2.2$  мэВ,  $\nu = \Delta_{\text{RKKY}}/h \approx 17 \text{ см}^{-1} \rightarrow 510$  ГГц ( $k_B$  – постоянная Больцмана,  $h$  – постоянная Планка). Поэтому в работе делается вывод о том, что наблюдаемая дисперсия проводимости связана с возникновением щели

при  $x = 6$  ат.%. Видно, что при комнатной температуре проводимость практически не зависит от частоты - типичный признак друдеской проводимости металлического типа в пределе низких частот. При понижении температуры проводимость обнаруживает значительную дисперсию, причём именно при переходе в спинстекольную фазу, при  $T < T_f$  (для  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$   $T_f \approx 25$  К) и на частотах, как раз соответствующих энергии РККИ-взаимодействия (для  $\Delta_{\text{RKKY}} \approx k_B T_f \approx 2.2$  мэВ,  $\nu = \Delta_{\text{RKKY}}/h \approx 17 \text{ см}^{-1} \rightarrow 510$  ГГц ( $k_B$  – постоянная Больцмана,  $h$  – постоянная Планка). Поэтому в работе делается вывод о том, что наблюдаемая дисперсия проводимости связана с возникновением щели

подвижности в подсистеме свободных электронов, которые при  $T < T_f$  оказываются вовлеченными в межпримесное РККИ-взаимодействие [A1, A2, A5, B18].

В пятой главе описываются результаты по наноразмерным эффектам в полупроводниковых структурах, применяемых в микроэлектронной технологии и перспективных для нужд кремниевой оптоэлектроники. В п. 5.1 описан процесс приготовления образцов нанопористого кремния, с применением различных методов электрохимического травления пластин кристаллического кремния. Отмечается зависимость фотолюминесцентных свойств исследуемых образцов от состава электролита, наличия дополнительной подсветки, удельного сопротивления исходных кремниевых пластин. Поскольку при таком способе травления модифицируется поверхностный слой монокристаллического кремния толщиной порядка 20 мкм, то при анализе оптических спектров структур их можно рассматривать как двухслойные, состоящие из слоёв кристаллического (c-Si) и нанопористого (p-Si) кремния. Здесь же приведены характеристики исследованных образцов.

В п. 5.2 описаны результаты по диэлектрическим свойствам серии образцов нанопористого кремния. На Рис. 5

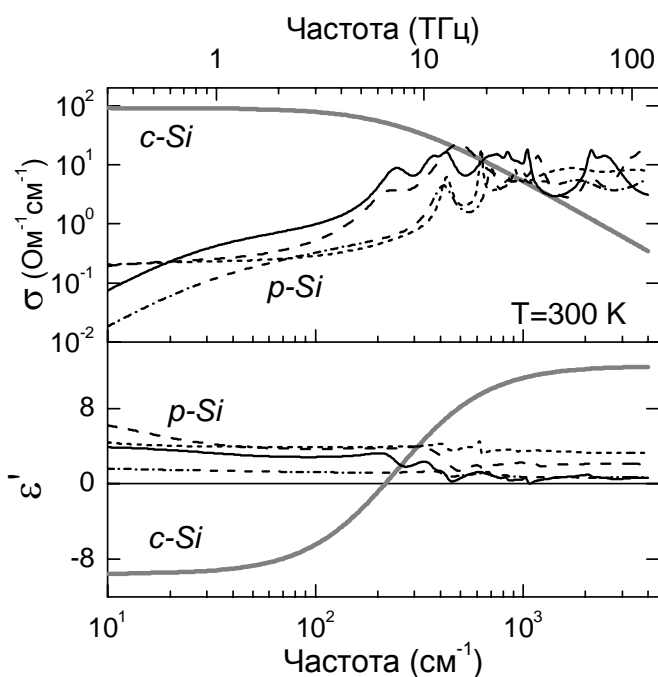


Рис.5. Частотные зависимости проводимости и диэлектрической проницаемости кристаллического (c-Si, толстые серые линии) и нанопористого (p-Si, тонкие линии) кремния, полученные при обработке спектров коэффициента отражения в рамках модели эффективной среды.

полученные в результате обработки экспериментальных спектров с применением модели

нанопористого кремния. На Рис. 5 представлены спектры проводимости  $\sigma(\nu)$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(\nu)$  c-Si и p-Si. Видно, что при изменении структуры кремния от монокристаллической (c-Si) в нанопористую (p-Si) характер спектров проводимости и диэлектрической проницаемости сменяется от типичного для металлов (падение  $\sigma(\nu)$  и рост  $\epsilon(\nu)$  с ростом  $\nu$ ) к типичному для диэлектриков (рост  $\sigma(\nu)$  и неизменная  $\epsilon(\nu)$  с ростом  $\nu$ ). Кроме того, на частотах выше  $100\text{ cm}^{-1}$  проявляются фоннные и примесные линии поглощения. В Таблице I представлены диэлектрические параметры кремния внутри наноразмерных кристаллитов,

эффективной среды. Видно, что характеристики кремниевых нановключений существенно отличаются от характеристик монокристаллического «массивного» кремния. В работе показано, что отличия обусловлены наноразмерными эффектами [А3, А4, Б1, Б4, Б6], приводящими к дополнительному рассеянию носителей заряда на границах включений и к увеличению запрещенной зоны материала вследствие квантового размерного эффекта.

Таблица I. Геометрические характеристики исследованных образцов нанопористого кремния (p-Si) и диэлектрические параметры кремниевых нановключений - частота рассеяния носителей  $\gamma^*$ , статическая проводимость  $\sigma_0^*$ , высокочастотная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_\infty^*$  - в сравнении с соответствующими параметрами исходного «массивного» кремния (c-Si), а также высокочастотный коэффициент отражения R.

Образец	Диаметр включений (нм)	Заполнение (%)	$\gamma^*$ (см <sup>-1</sup> )	$\sigma_0^*$ (Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup> )	$\epsilon_\infty^*$	R
<b>c – Si</b>			<b>227</b>	<b>91</b>	<b>12.5</b>	<b>0.31</b>
V1-E2	6.8±0.2	40±2	3220±40	6.5±0.1	7.6±0.2	0.017
V3-E1	1.3±0.2	51±0.5	17600±1100	1.2±0.1	8.2±0.2	0.084
V3-E2	4.9±0.1	41±0.5	4400±30	4.76±0.04	6.8±0.1	0.006
V3-E4	4.1±0.1	41±1	5270±120	3.97±0.1	6.4±0.1	0.035

II. 5.3 содержит описание исследованных гетероструктур Ge/Si(001) с квантовыми точками германия. Образцы представляли собой многослойные «сэндвичи», состоящие из монокристаллической подложки кремния с ориентацией (100), на которую методом

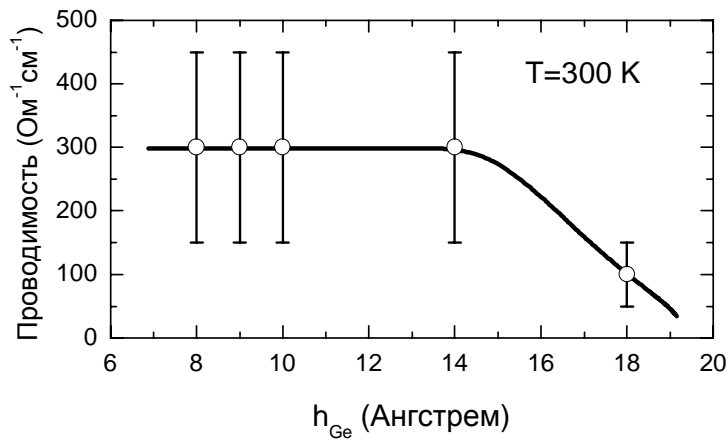


Рис.6. Зависимость эффективной проводимости массива квантовых точек германия от количества осажденного германия ( $h_{Ge}$ ).

молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ) послойно осаждались слои кремния и германия.

В проведенных экспериментах германий, осажденный на поверхность кремния Si(001) методом МЛЭ при низкой температуре подложки (375 °С) с эквивалентной толщиной ( $h_{Ge}$ ) от ~ 4 до ~ 18 Å (от ~ 3 до ~ 13 монослоев, толщина 1 монослоя Ge на поверхности Si(001)

составляет ~ 1.4 Å), самоорганизовался по механизму Странского-Крастанова в массивы пирамидальных и клиновидных кластеров (так называемых hut-кластеров) – массивы квантовых точек с характерными размерами оснований порядка десятков нанометров и отношением высоты к ширине основания ~ 0,1. Плотность квантовых точек в массивах



зависела от величины  $n_{Ge}$  и составляла  $(2 - 6) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и с высокой степенью точности совпадала с плотностью дырок, оцененной из измерений вольт-емкостных (C-V) характеристик. Измеренная в работе при комнатной температуре эффективная проводимость таких слоев с наноразмерными кластерами германия ( $\sim 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) оказалась на несколько порядков выше проводимости изначального монокристаллического германия ( $\sim 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) [Б7, Б10]. На Рис. 6 показана зависимость эффективной проводимости слоя квантовых точек от важного технологического параметра  $n_{Ge}$  - количества осажденного германия. С увеличением эквивалентной толщины осажденного германия фактически происходит переход от квантовых точек к сплошному слою за счёт, в конечном счёте, слияния кластеров в однородный слой кристаллического германия. Из рисунка видно, что при этом наблюдается тенденция к падению эффективной проводимости слоя квантовых точек в направлении к проводимости объемного кристаллического германия. В работе предполагается, что процессом, ответственным за наблюдаемое увеличение проводимости в массиве квантовых точек, является диффузия носителей тока из подложки и/или из буферного слоя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Методами терагерцовой ЛОВ-спектроскопии, инфракрасной Фурье-спектроскопии и оптической эллипсометрии впервые измерены широкодиапазонные (частота от нескольких обратных сантиметров до  $33\ 000\ \text{см}^{-1}$ ) спектры проводимости и диэлектрической проницаемости ряда проводящих материалов в условиях, когда свойства электронной подсистемы зависят от наноразмерных эффектов: наноструктурированных манганитов состава  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ , твёрдых растворов  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  с ферромагнитными нанокластерами, нанопористого кремния и гетероструктур германий-кремний с квантовыми точками германия.

2. В поликристаллических манганитах состава  $\text{La}_{0.15}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  в фазе с зарядовым упорядочением на частотах  $30 - 100\ \text{см}^{-1}$  обнаружены полосы поглощения, теряющие интенсивность при уменьшении размеров кристаллитов от  $1000\ \text{нм}$  до  $40\ \text{нм}$ . Установлено, что происхождение полос не связано с коллективным откликом упорядоченной фазы, а обусловлено акустическими фононами, приобретающими оптическую активность благодаря перебросу акустических ветвей в центр зоны Бриллюэна при структурном фазовом переходе. Показано, что подавление полос в наноструктурированных образцах свидетельствует о слабой связи зарядового и магнитного параметров порядка с фононной подсистемой.

3. В концентрированных растворах золото-железо  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x \leq 22\ \text{ат.}\%$ ) на частотах  $1000 - 3000\ \text{см}^{-1}$  обнаружена резонансная линия поглощения. Показано, что природа линии связана с локализацией носителей заряда в наноразмерных ферромагнитноупорядоченных кластерах ионов железа.

4. В разбавленном растворе  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x = 6\ \text{ат.}\%$ ) обнаружено уменьшение динамической проводимости на частотах ниже  $30\ \text{см}^{-1}$  при переходе в фазу спинового стекла. Показано, что обнаруженная особенность связана с возникновением щели подвижности в энергетическом спектре электронов проводимости за счёт их вовлечения в межпримесное РККИ-взаимодействие.

5. Определены диэлектрические характеристики кремниевых нанокристаллитов в нанопористом кремнии. Показано, что эти характеристики отличаются от характеристик монокристаллического кремния, и что отличия определяются квантово-размерными эффектами и рассеянием носителей тока на границах нановключений. В гетероструктурах  $\text{Ge/Si}(001)$  с квантовыми точками германия впервые измерена эффективная проводимость массива квантовых точек и обнаружено, что она на несколько порядков величины превышает проводимость «массивного» германия. Предложен механизм возрастания

проводимости, основанный на учёте диффузии носителей тока из кремниевых подложек в слой с квантовыми точками германия.

### Список цитируемой литературы

1. Coey J.M.D., Viret M., von Molnar S. Mixed-valence manganites // *Advances in Physics* - 2009. - vol.58. - N6. - P.571-697.
2. Basov D., Timusk T. Electrodynamics of high- $T_c$  superconductors // *Rev. Mod. Phys.* – 2005. - Vol.77. - P.721-779.
3. Coles B. R. in *Amorphous Magnetism* // edited by H. O. Hooper and A. M. deGraaf. - New York: Plenum Press, 1973.
4. Hebard A.F. Buckminsterfullerene // *Annu. Rev. Mater. Sci.* – 1993. - V.23. - P.159- 191.
5. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // *Appl. Phys. Lett.* – 1990. - Vol.57. – P.1046-1048.
6. Zhang T., Zhou T. F., Qian T., and Li X. G. Particle size effects on interplay between charge ordering and magnetic properties in nanosized  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  // *Phys. Rev. B* – 2007. – Vol.76. – P.174415-174421.
7. Тинкхам М. Введение в сверхпроводимость. – М.:Атомиздат, 1980. – 312 с.
8. Dordevic S.V., Basov D. N. Electrodynamics of correlated electron matter // *Ann. Phys.* – 2006. – Vol.15. - No. 7 – 8. – P.545–570.
9. Горшунов Б.П., Волков А.А., Прохоров А.С., Спектор И.Е. Методы терагерцовой-субтерагерцовой ЛОВ-спектроскопии проводящих материалов // *Физика Твёрдого Тела* -2008. - том 50. - вып. 11. – С.1921-1932.
10. Jin S., Tiefel T. H., McCormack M., Fastnacht R. A., Ramesh R., and Chen L. H. Thousandfold Change in Resistivity in Magnetoresistive La-Ca-Mn-O Films // *Science.* – 1994. –Vol.264. – P.413-415.
11. Dagotto E., Hotta T., and Moreo A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation // *Phys. Rep.* – 2001. – Vol.344. – P.1-153.
12. Lopez-Quintela M.A., Hueso L.E., Rivas J. and Rivadulla F. Intergranular magnetoresistance in nanomanganites // *Nanotechnology.* – 2003. – Vol.14. – P.212–294.
13. Mulder C.A., van Duynveldt A.J., Mydosh J. A. Susceptibility of the CuMn spin-glass: Frequency and field dependences // *Phys. Rev. B* – 1981. - Vol.23. – P.1384-1396.
14. Binder K., Yong A.P. Spin glasses: Experimental facts, theoretical concepts, and open questions // *Rev. Mod. Phys.* – 1986. – Vol.58. – P.801-976.
15. Ford P.J., Mydosh J.A. Electrical resistivity of noble-metal-host-3d solute spin-glass alloys // *Phys. Rev. B* – 1976. – Vol.14. – P.2057-2070.
16. Canella V., Mydosh J.A. Magnetic Ordering in Gold-Iron Alloys // *Phys. Rev. B* – 1972. – Vol.6. – P.4220-4237.
17. Bisia O., Ossicini Stefano, Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // *Surface Science Reports* – 2000. – Vol.38. – P.1-126.
18. Mo Y.-W., Savage D. E., Swartzentruber B. S., and Lagally M. G. Kinetic pathway in Stranski-Krastanov growth of Ge on Si(001) // *Phys. Rev. Lett.* – 1990. – Vol.65. – P.1020–1023.
19. Nucara A., Maselli P., Calvani P. et al. Observation of charge-density-wave excitations in manganites // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol.101. – P.066407- 066410.

### Список публикаций по теме диссертации

- A1. Gorshunov B., Prokhorov A. S., Kaiser S., Faltermeier D., Yasin S., Dumm M., Drichko N., Zhukova E. S., Spektor I. E., Vongtragool S., Hesselberth M. B. S., Aarts J., Nieuwenhuys G. J. and Dressel M. Charge localization due to RKKY interaction in the spin-glass AuFe // *Europhys. Lett.* – 2006. – Vol.76. – No.5. - P.938-944.
- A2. Прохоров А.С., Анзин В.Б., Витухновский Д.А., Жукова Е.С., Спектор И.Е., Горшунов Б.П., Вонтрагол С., Хасельберт М. Б. С., Аартс И., Ньювенхаус Г. И., Думм М., Фальтрмайер Д., Кайзер Ш., Ясин С., Дрессель М., Дричко Н. Терагерцовая спектроскопия спиновых стекол AuFe // *ЖЭТФ.* -2006. - т.130. - вып. 6(12). - С.1027-1038.
- A3. Жукова Е.С., Прохоров А.С., Спектор И.Е., Караванский В.А., Мельник Н.Н., Заварицкая Т.Н., Горшунов Б.П. Электродинамические свойства нанопористого кремния в диапазоне от терагерцового до инфракрасного // *ФТТ.* – 2007. - т.49. - в. 12. - С. 2137-2145.
- A4. Прохоров А.С., Жукова Е.С., Спектор И.Е., Караванский В.А., Горшунов Б.П. Инфракрасная спектроскопия нанопористого кремния // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2007. - т. L. - N10-11. - С. 908-917.
- A5. Прохоров А. С., Жукова Е. С., Спектор И. Е., Горшунов Б. П., Вонтрагол С., Хасельберт М. Б. С., Аартс И., Ньювенхаус Г. И., Фальтрмайер Д., Кайзер Ш., Дрессель М. РККИ–взаимодействие и псевдощель в терагерцовых спектрах проводимости спинового стекла AuFe // *Физика металлов и металловедение.* – 2008. - т. 106. - № 3. - С. 257-262.
- A6. Gorshunov B., Kaiser S., Zhukova E. S., Prokhorov A. S., Hesselberth M. B. S., Aarts J., Nieuwenhuys G. J., and Dressel M. Charge carrier localization due to ferromagnetic clusters in concentrated AuFe alloys // *Phys. Rev. B* -2009. - 79(5). - P. 054203-054206.
- A7. Прохоров А.С., Жукова Е.С., Горшунов Б.П., Хазельберт М.Б.С., Аартс И., Нойенхаус Г. И., Кайзер Ш., Дрессель М. Локализация электронов проводимости в ферромагнитных кластерах AuFe // *Письма в ЖЭТФ* -2009. - том. 89. - N9. - С. 555-559.
- A8. Zhang Tao, Zhukova E., Gorshunov B., Wu Dan, Prokhorov A.S., Torgashev V.I., Maksimov E.G., and Dressel M. Terahertz spectroscopy of low-energy excitations in  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  // *Phys. Rev. B* – 2010. –Vol.81. – P. 125132-125141.
- A9. Горшунов Б.П., Жукова Е.С., Максимов Е.Г., Прохоров А.С., Торгашёв В.И., Zhang T., Wu D., Dressel M. Природа низкоэнергетических возбуждений зарядово-упорядоченной фазы манганитов состава  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  // *Письма в ЖЭТФ* – 2010. –т.91. -№7. – С. 363-368.

### Тезисы докладов на конференциях.

- Б1. Жукова Е.С., Караванский В.А., Прохоров А.С., Горшунов Б.П.. Инфракрасная спектроскопия нанопористого кремния. Молодёжная конференция Физика и прогресс. 14 – 16 ноября 2007, Санкт-Петербург,. 75 стр.
- Б2. Е.С. Жукова, Б.П. Горшунов, В.А. Караванский. Терагерцовая и инфракрасная спектроскопия нанопористого кремния. 50-я Юбилейная Научная конференция МФТИ, 23-27 ноября 2007 г., г. Долгопрудный Московской области.

- Б3. Е.С. Жукова, А. Аартс, Б.П. Горшунов, М. Дрессель, Г.И. Ньювенхаус, И.Е. Спектор, М.Б.С. Хессельберт, А.С. Прохоров. Исследование механизма рассеяния носителей на магнитных центрах методами терагерцовой спектроскопии. 50-я Юбилейная Научная конференция МФТИ, 23-27 ноября 2007 г., г. Долгопрудный Московской области.
- Б4. Е.С. Жукова, А.С. Прохоров, И.Е. Спектор, В.А. Караванский, Б.П. Горшунов. Терагерцовая спектроскопия нанопористого кремния. Конференция по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению. (Посвящается 50-летию ядерного реактора ИРТ), 26-30 ноября 2007, Москва, 53 стр.
- Б5. Л.В. Арапкина, Б.П. Горшунов, Е.С. Жукова, В.П. Калинушкин, Г.Н. Михайлова, А.С. Прохоров, В.А. Чапнин, К.В. Чиж, В.А. Юрьев. Терагерцовая проводимость гетероструктур Ge/Si(001) с квантовыми точками. КРЕМНИЙ-2008 V Международная конференция и IV школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе. 1-4 июля 2008, Черногловка.
- Б6. Жукова Е.С., Горшунов Б.П., Караванский В.А., Прохоров А.С., Терагерцовая и инфракрасная спектроскопия нанопористого кремния, Российское совещание по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники Фотоника 2008, 19-23 августа 2008, Новосибирск, 62 стр.
- Б7. Б.П. Горшунов, Е.С. Жукова, А.С. Прохоров, И.Е. Спектор, Г.Н. Михайлова, Л.В. Арапкина, В.П. Калинушкин, В.А. Чапнин, К.В. Чиж, В.А. Юрьев. Диэлектрические измерения полупроводниковых материалов. Российское совещание по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники Фотоника 2008. 19-23 августа 2008, Новосибирск, 63 стр.
- Б8. E.S.Zhukova, V.P.Gorshunov, A.S.Prokhorov, I.E. Spektor, Yu. G. Goncharov, L.V.Arapkina, V.A.Chapnin, V.P.Kalinushkin, G.N.Mikhailova, and V.A.Yuryev. Terahertz conductivity of Ge/Si(001) heterostructures with quantum dots. 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, September 15 – 19, 2008, California Institute of Technology, Pasadena . California USA.
- Б9. В.А. Караванский, Н.Н. Мельник, Т.Н. Заварицкая, Е.С. Жукова, Б.П. Горшунов. Кремний, легированный сурьмой, - пористые структуры и продукты травления при использовании йод-содержащих электролитов. "Комбинационное рассеяние - 80 лет исследований" (КР80). 08 - 10 октября 2008 г., г. Москва.
- Б10. Е. Zhukova. Terahertz conductivity of Ge/Si (001) heterostructures with quantum dots. International Workshop Nonequilibrium Nanostructures (Nonna). December 01 - 06, 2008, Dresden, Germany. p. 32.
- Б11. А.С. Прохоров, Б.П. Горшунов, Е.С. Жукова, М.В.С. Hesselberth, J. Aarts, G.J. Nieuwenhuys, S. Kaiser, M. Dressel. Терагерцовая спектроскопия спиновых стёкол  $Au_{1-x}Fe_x$ . Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. 2-5 марта 2009 г., Нижний Новгород, стр. 62.
- Б12. Б.П. Горшунов, А.С. Прохоров, Е.С. Жукова, В.А. Чапнин, К.В. Чиж, В.П. Калинушкин, Г.Н. Михайлова, В.А. Юрьев. Терагерцовая проводимость гетероструктур Ge/Si (001) с квантовыми точками. Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. 2-5 марта 2009 г., Нижний Новгород.
- Б13. Е.С. Жукова, Б.П. Горшунов, А.С. Прохоров, M. Dressel, D. Wu, T. Zhang, X.G. Li. Терагерцовая спектроскопия наноструктурированных манганитов состава

- $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . XII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн», 25-30 мая 2009г., Московская обл., пансионат «Университетский».
- Б14. T. Zhang, B. Gorshunov, E. S. Zhukova, D. Wu, M. Dressel. Terahertz spectroscopy of nanosized manganites  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . 5th International Workshop on Nanomagnetism and Superconductivity. 5-9 July 2009, Coma-Ruga, Spain.
- Б15. Е.С. Жукова, Б.П. Горшунов, А.С. Прохоров, В.И. Торгашев, M. Dressel, D. Wu, T. Zhang, X.G. Li. Волна зарядовой плотности в наноструктурированных манганитах  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . II Международный, Междисциплинарный Симпозиум "Среды со структурным и магнитным упорядочением" (Multiferroics-2) (ODPO-12). 23-28 сентября 2009 г. Ростов-на-Дону - п. Лоо.
- Б16. Горшунов Б.П., Жукова Е.С., Спектор И.Е., Прохоров А.С., Zhang T., Wu D., Dressel M., Li H.G.. Терагерцовая спектроскопия наноструктурированных манганитов  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ . XXXV Собрание по физике низких температур, 29 сентября – 2 октября 2009г., Черногловка, 109 стр.
- Б17. Е.С. Жукова, Б.П. Горшунов, И.Е. Спектор, А.С. Прохоров, M.B.S. Hesselberth, J. Aarts, G.J. Nieuwenhuys, S. Keiser, M. Dressel. Оптическая спектроскопия спиновых стекол AuFe. XXXV Собрание по физике низких температур, 29 сентября – 2 октября 2009г., Черногловка, 239 стр.
- Б18. Жукова Е.С., Горшунов Б.П., Прохоров А.С.. Оптическая спектроскопия материалов с электронными корреляциями. Труды 52 Научной конференции МФТИ, 27-30 ноября 2009г., г. Долгопрудный, Московской области, 19 стр.