

На правах рукописи

Ерофеева Ирина Викторовна

**СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ
В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2006

Работа выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН), г. Нижний Новгород

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук В.И.Гавриленко
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Д.А.Фирсов, СПбСПУ кандидат физико-математических наук М.Н.Дроздов ИФМ РАН
Ведущая организация	Институт радиотехники и электроники РАН, г.Москва

Защита состоится 15 июня 2006 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (603950, г.Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан “ ___ ” мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук
профессор

К.П.Гайкович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Исследования квантоворазмерных полупроводниковых систем, которые проводились в течение последних двух десятилетий, уже привели к созданию целого ряда новых приборов, от одноэлектронных транзисторов до источников и приемников излучения различных диапазонов. Однако терагерцовый (субмиллиметровый, дальний ИК) диапазон все еще недостаточно «освоен» твердотельными приборами, которые могли бы испускать и детектировать излучение селективным образом. Такие приборы могли бы иметь широкое применение, например, для формирования ТГц-изображения в медицине, в качестве химических и биологических сенсоров, в широкополосной связи, радиоастрономии, для диагностики атмосферы со спутников, в компьютерной технике, тестировании интегральных схем и др. В будущем возможно применение терагерцового излучения для соединения интегральных схем, соединений компьютер-компьютер, коммуникации «последней мили». В этом плане перспективными являются исследования полупроводниковых низкоразмерных гетероструктур, энергии переходов в которых попадают в терагерцовый диапазон. В настоящее время в исследуемом диапазоне известны приемники на свободных носителях, работающие в условиях квантового эффекта Холла (КЭХ) [1, 2], приемники на основе вертикального транспорта в квантовых ямах [см., напр., 3], приемники на квантовых точках [4] и на примесных переходах [A5]. Изучаемые в данной работе низкоразмерные структуры изготовлены из широко используемых в производстве материалов, таких как GaAs и его сплав с Al, Ge и его твердый раствор GeSi, технологии роста которых уже хорошо отработаны. Проведенные исследования были направлены на изучение фотоотклика гетероструктуры GaAs/AlGaAs в условиях КЭХ и гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами на дальнее ИК (терагерцовое) излучение и возможности создания селективных перестраиваемых детекторов излучения данного диапазона на основе рассматриваемых структур.

Целью диссертационной работы является установление основных закономерностей фотопроводимости (ФП) низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур в дальнем ИК диапазоне и детальное исследование механизмов фотоотклика. В структурах с гетеропереходом GaAs/AlGaAs основное внимание было уделено перестройке полосы fotocувствительности в условиях КЭХ, а также временным характеристикам фотоотклика. В другой исследованной гетеросистеме – напряженных гетероструктурах Ge/GeSi *p*-типа с квантовыми ямами - исследовались спектральные характеристики ФП, связанной с фотовозбуждением акцепторов, и их эволюция в сильных магнитных полях.

Научная новизна

1. Экспериментально показано, что спектр фотоотклика двумерного электронного газа в гетероструктуре GaAs/AlGaAs в условиях КЭХ вблизи магнитных полей, соответствующих четным факторам заполнения уровней Ландау представляет линию на частоте циклотронного резонанса (ЦР) шириной от 2 до 5 см⁻¹. Впервые продемонстрирована возможность значительной (до 80%) перестройки полосы фотоотклика при одновременном увеличении магнитного поля и концентрации двумерных электронов за счет эффекта остаточной фотопроводимости.
2. Обнаружено экспоненциальное возрастание с магнитным полем времени фотоотклика на ЦР двумерных электронов в гетероструктуре GaAs/AlGaAs в условиях целочисленного КЭХ, что связано с пространственным разделением фотовозбужденных электронов и дырок вследствие захвата на локализованные состояния. Определен характерный размер флуктуаций потенциала, составляющий 400 – 600 Å.
3. В гетероструктуре Ge/GeSi *p*-типа в спектрах примесной ФП при $T = 4.2$ К обнаружены переходы с основного состояния акцептора в резонансные состояния, связанные с 2-й и 3-й подзонами размерного квантования. В квантующих магнитных полях в спектрах ФП обнаружены переходы типа 1s-2p₊ для примесей в центре квантовой ямы 1s-2p₊ для примесей, расположенных в центрах квантовых ям и центрах барьерных слоев GeSi.
4. Обнаружено, что ширина линий субмиллиметрового дифференциального примесного магнитопоглощения гетероструктурах Ge/GeSi при межзонной подсветке в несколько раз меньше ширины наблюдающихся в той же области спектра линии примесной ФП. В спектрах поглощения разрешены переходы, связанные с возбуждением мелких акцепторов, расположенных в барьерных слоях GeSi и на гетерогранице.

Научная и практическая значимость результатов

Научная значимость полученных результатов заключается в установлении взаимосвязи характеристик фотоотклика на ЦР электронов в GaAs/AlGaAs с фундаментальными свойствами двумерной системы в условиях КЭХ. Экспериментально выявлены основные особенности энергетического спектра мелких акцепторов в напряженных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании селективных, перестраиваемых магнитным полем фотоприемников субмиллиметрового диапазона на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs и Ge/GeSi.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Полоса чувствительности приемника на ЦР электронов в GaAs/AlGaAs в условиях КЭХ может перестраиваться при одновременном увеличении магнитного поля и концентрации двумерных электронов (за счет эффекта остаточной ФП).
2. Постоянная времени фотоотклика на ЦР электронов в GaAs/AlGaAs в условиях КЭХ быстро нарастает с магнитным полем вследствие уменьшению перекрытия волновых функций локализованных на флуктуациях потенциала фотовозбужденных носителей. Этот эффект позволяет определять характерный размер крупномасштабных флуктуаций потенциала.
3. В спектрах примесной ФП гетероструктур Ge/GeSi с остаточными акцепторами помимо линий, обусловленных фотоионизацией примесей наблюдаются переходы на резонансные состояния, относящиеся к 2-й и 3-й подзонам размерного квантования.
4. В спектрах примесной ФП и примесного поглощения в гетероструктурах Ge/GeSi с остаточными акцепторами в сильных магнитных полях доминируют переходы, энергия которых линейно возрастает с магнитным полем. Эти спектральные особенности связаны с переходами типа $1s-2p_+$ для нейтральных примесей, ионы которых расположены вблизи центров квантовых ям Ge и барьеров GeSi, а также на гетерограницах.

Личный вклад автора в получение результатов

- Определяющий в проведение измерений спектров фотоотклика образцов гетероструктур GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом, обработку и интерпретацию их результатов [A11, A16, A18, A19, A21, A28, A33, A35, A40, A42, A44, A53, A56].
- Равнозначный в подготовку измерений временных характеристик фотоотклика с гетероструктурах GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом и эксперимента по наблюдению рекомбинационного примесного излучения из гетероструктуры Ge/GeSi, обработку и интерпретацию их результатов (совместно с научным руководителем) [A46, A47, A50, A52, A54].
- Основной в подготовку и проведение измерений спектров примесной ФП образцов гетероструктур Ge/GeSi с остаточными акцепторами методами фурье- и ЛОВ-спектроскопии, обработку и интерпретацию их результатов [A1-A8, A10, A12-A15, A22, A25, A27, A31, A32, A34, A36-A39, A41, A43, A45, A48, A49, A51, A55].
- Равнозначный в подготовку измерений спектров магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi, обработку и интерпретацию их результатов (совместно с Д.Б.Векслером и А.В.Иконниковым и М.Д.Молдавской)

[A9, A17, A20, A23, A24, A26, A29, A57-A65].

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на Всероссийских совещаниях «Наноструктуры на основе кремния и германия» (1998, Н.Новгород) и «Нанофотоника» (1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, Н.Новгород), на 3, 4, 5 и 6 Всероссийских конференциях по физике полупроводников (1997, Москва; 1999, Новосибирск; 2001, Н.Новгород; 2003, Санкт-Петербург), на 4, 6, 6, 9, 11 и 12 Международных симпозиумах «Наноструктуры: физика и технология» (1996, 1998, 2000, 2001, 2003, 2004, Репино), 8 Международной конференции по мелким примесным центрам в полупроводниках (1998, Монпелье, Франция), 23, 24 и 25 Международных конференциях по физике полупроводников (1996, Берлин, Германия; 1998, Иерусалим, Израиль; 2000, Осака, Япония), 2 Российско-украинской конференции «Нанофизика и наноэлектроника» (2000, Киев, Украина), Международном симпозиуме по исследованию полупроводниковых приборов (1997, Шарлоттсвилль, США), Международной школе по материаловедению и электронной микроскопии (1997, Халле, Германия), 10 Международном симпозиуме по сверхбыстрым явлениям в полупроводниках (1998, Вильнюс, Литва), 24 и 25 Международных симпозиумах по составным полупроводникам (1996, Санкт-Петербург; 1998, Нара, Япония), 13 Уральской международной школе по физике полупроводников (1999, Екатеринбург), 9 и 10 Международных конференциях по модулированным полупроводниковым структурам (1999, Фукуока, Япония; 2001, Линц, Австрия).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 65 печатных работ [A1-A65], в том числе 15 статей в научных журналах и 50 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего в себя список цитированной литературы и список работ автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 138 страниц, включая 64 страницы основного текста (в том числе 5 таблиц), 69 рисунков, размещенных на 61 странице, список цитированной литературы из 78 наименований и список работ автора по теме диссертации из 65 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, его цель и научная новизна. Приводится краткое содержание диссертации, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 представляет собой обзор литературы, который состоит из двух частей. В первой части обзора рассматривается литература по исследованию ФП в условиях КЭХ.

В первом параграфе первой части рассмотрены работы по исследованию КЭХ в гетероструктурах GaAs/AlGaAs, рассмотрен механизм КЭХ. Во втором параграфе обсуждаются работы по изучению ФП гетероструктур GaAs/AlGaAs на ЦР электронов в условиях КЭХ и возможности перестройки области фоточувствительности приемника, приводятся достигнутые характеристики фотоприемников. В третьем параграфе рассмотрено недавно обнаруженное явление осцилляций ФП в «слабых» магнитных полях. В четвертом параграфе обсуждается механизм фотоотклика в гетероструктурах GaAs/AlGaAs в условиях КЭХ и роль случайного потенциала в формировании фотоотклика.

Вторая часть обзора посвящена исследованию напряженных Ge/GeSi гетероструктур с квантовыми ямами.

Глава 2 посвящена изучению механизма фотоотклика в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом. Приведено описание экспериментальной установки и параметры изучаемого образца (часть 1), описано наблюдение осцилляций Шубникова – де Гааза (ШДГ) и фотоотклика гетероструктуры GaAs/AlGaAs на ЦР двумерных (2D) электронов в условиях КЭХ на широкополосное излучение абсолютно черного тела (часть 2). В третьей части проведено исследование фотоотклика на монохроматическое излучение в дальнем ИК диапазоне. В четвертой части описано наблюдение осцилляций фотоотклика в слабых магнитных полях. В пятой части второй главы проведено детальное изучение спектров ФП приемника на основе GaAs/AlGaAs гетероструктуры в условиях КЭХ при различных значениях фактора заполнения уровней Ландау. Выделены зоны чувствительности фотоприемника в дальнем ИК диапазоне.

Результаты проведенных спектральных исследований показывают, что фотоотклик приемника представляет собой узкие пики шириной $2 - 5 \text{ см}^{-1}$. В развертке по магнитному полю положение пиков приходится на минимумы в осцилляциях ШДГ, соответствующие четным значениям фактора заполнения уровней Ландау ν . Максимальный фотоотклик наблюдается при значениях магнитных полей на $\sim 5\%$ превышающих значение магнитного поля, соответствующее фактору заполнения ν . В случае, когда циклотронный резонанс приходится в область магнитных полей до 1 Т, фотоотклик представляет собой широкую линию циклотронного резонанса, изрезанную

осцилляциями, по периоду соответствующими осцилляциям ШДГ. В слабых магнитных полях (до 0.5 Т) в фотоотклике приемника наблюдается отрицательный сигнал, имеющий ту же природу, что и состояния с нулевым продольным сопротивлением в образцах с большей подвижностью.

Спектры фотоотклика приемника образуют отдельные зоны fotocувствительности, соответствующие каждому четному значению фактора заполнения, в пределах которых возможна плавная перестройка частоты фотоотклика изменением магнитного поля.

В **Главе 3** подробно исследована перестройка полосы чувствительности приемника на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs путем изменения концентрации двумерных носителей заряда с помощью подсветки излучением GaAs-светодиода. При этом новое значение концентрации двумерных электронов сохраняется длительное время вплоть до отогрева образца, что связано с эффектом остаточной ФП [5]. В первой части описана экспериментальная установка и методика эксперимента. Во второй части подробно изучено изменение осцилляций ШДГ и фотоотклика приемника на излучение абсолютно черного тела (АЧТ) при увеличении дозы подсветки GaAs-светодиода. Положение каждого максимума фотоотклика смещается в область больших магнитных полей соответственно каждому минимуму в осцилляциях ШДГ. Максимальная достигнутая перестройка составляет 80%. В третьей части проведены спектральные исследования изменения фотоотклика в зависимости от магнитного поля при приеме монохроматического излучения ламп обратной волны (ЛОВ) (п.3.3.1) и перестройка области чувствительности в фурье-спектрах (п.3.3.2) при увеличении концентрации носителей. Продемонстрировано, что полоса чувствительности, соответствующая фактору заполнения $\nu = 6$, с увеличением дозы подсветки плавно перестраивается с 25 до 38 см^{-1} , обеспечивая, таким образом, перекрытие всего диапазона частот между областями чувствительности приемника с $\nu = 6$ и $\nu = 4$ до подсветки. Показано, что, перестраивая указанным образом зоны чувствительности с $\nu = 2, 4, 6$ и 8 , можно перекрыть диапазон приема излучения от 20 до 80 см^{-1} . Для демонстрации возможности использования приемника впервые было исследовано рекомбинационное излучение гетероструктур Ge/GeSi, определена его природа [A53] (четвертая часть). В пятой части исследованы временные характеристики прибора в широком диапазоне магнитных полей. Показано, что время фотоотклика экспоненциально возрастает с ростом магнитного поля (от 100 мкс при $B = 2,6 \text{ Т}$ до 310 мкс при $B = 3,9 \text{ Т}$ в пределах одной зоны чувствительности ($\nu = 4$), и до $1,3 \text{ мс}$ при $B = 5,3 \text{ Т}$ ($\nu = 2$)). Из этих данных определен масштаб пространственных флуктуаций случайного потенциала, который составил $400\text{-}600 \text{ \AA}$; приведено сравнение с ранее полученными результатами других авторов.

В Главе 4 представлено изучение ФП гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами. В первой части приводится описание гетероструктур Ge/GeSi, характерной особенностью которых является встроенная деформация слоев (двуосное в плоскости слоя сжатие слоев Ge и растяжение слоев GeSi). Описывается зонная диаграмма, рассчитанная для данных структур (по литературе), приведены параметры изучаемых образцов. Во второй части описана экспериментальная установка для исследования ФП в Ge/GeSi гетероструктурах. В третьей части проводится подробное изучение спектров ФП гетероструктур с различной шириной квантовых ям. Экспериментально наблюдаемые спектральные особенности ФП образцов с узкими квантовыми ямами $\sim 200 \text{ \AA}$ в области $\sim 55 \text{ см}^{-1}$ и $20\text{-}40 \text{ см}^{-1}$ связываются с ионизацией акцепторных центров в гетероструктуре, расположенных в центре квантовой ямы и в некоторой области вблизи него, на гетерогранице, а также в центре барьера (расчет выполнен Д.В.Козловым [A43]). В спектре ФП образца с более широкими квантовыми ямами ($\sim 350 \text{ \AA}$) наблюдается одна ярко выраженная спектральная полоса в области 55 см^{-1} , которая связывается с переходами из основного состояния мелких акцепторов, расположенных в центральной части квантовой ямы, в континуум. Поскольку большая часть примеси (около 75%) при равномерном распределении ее по квантовой яме имеет энергию ионизации, близкую к энергии ионизации акцептора, расположенного в центре квантовой ямы (расчет Д.В.Козлова [A31]), ФП в этом образце в основном определяется фотоионизацией примеси в центре квантовых ям. Спектр ФП образца с очень широкой потенциальной ямой (800 \AA), в котором эффекты размерного квантования незначительны, существенно сдвинут в более длинноволновую область по сравнению со спектром объемного *p*-Ge из-за встроенной деформации. Наблюдаемая дополнительная спектральная особенность (43 см^{-1}) в нем соответствует переходу с основного состояния акцептора в первое возбужденное $1s \rightarrow 2p_0$. Спектральные особенности, связанные с примесью *n*-типа, в исследуемых гетероструктурах наблюдаются только при использовании подсветки GaAs-светодиода ($\lambda = 0.9 \text{ мкм}$). Их положение, по сравнению с областями фоточувствительности, обусловленными переходами, характерными для центров *p*-типа в Ge/GeSi, приходится на более коротковолновую часть дальнего ИК диапазона ($65\text{-}110 \text{ см}^{-1}$). В четвертой части изучается изменение спектров ФП гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами в магнитном поле, определяется связь спектральных линий с примесными переходами. В наблюдаемых спектрах ФП основные линии в магнитном поле остаются узкими, с шириной линии $\sim 10 \text{ см}^{-1}$. Их положение линейно изменяется с ростом магнитного поля (свыше 1 Т). В пятой части проводится исследование более коротковолновой части спектра ФП, где были обнаружены спектральные особенности, связанные с переходами на резонансные состояния акцепторов в гетероструктуре с квантовыми ямами.

Глава 5 посвящена экспериментальному исследованию гетероструктур Ge/GeSi с помощью источников монохроматического субмиллиметрового излучения (ЛОВ). Большая мощность излучения ЛОВ позволила впервые наряду с ФП исследовать примесное поглощение в этих гетероструктурах. В первой части описана экспериментальная установка для проведения опытов по исследованию ФП и магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi в диапазоне $400 \div 1250$ ГГц. Во второй части исследуется ФП двух образцов гетероструктур Ge/GeSi с различной шириной квантовой ямы (200 \AA и 355 \AA), изучается положение примесной линии в магнитном поле при различных частотах падающего излучения. В третьей части приведены полученные спектры примесного магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi при межзонном оптическом возбуждении, проводится идентификация наблюдаемых спектральных линий. В спектрах магнитопоглощения гетероструктур Ge/GeSi помимо линий циклотронного резонанса дырок (переходы между симметричными и антисимметричными уровнями Ландау) были обнаружены новые линии и установлено, что они обусловлены переходами с участием акцепторов. Показано, что часть примесных линий соответствует переходам с $1s$ состояния акцепторов, расположенных в центре барьеров, на $2p_+$ состояния, связанные с 1-ой и 2-ой подзонами размерного квантования. Наиболее коротковолновая спектральная особенность связана с переходом $1s \rightarrow 2p_+$ для примесей на гетерогранице. Проведенные измерения позволили подробно изучить длинноволновую часть спектра поглощения гетероструктур Ge/Ge $_{1-x}$ Si $_x$.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. Методом фурье-спектроскопии впервые проведены спектральные исследования фотоотклика приемника на ЦР двумерных электронов в гетероструктуре GaAs/AlGaAs при $T = 4.2\text{K}$ ($n_s = (2-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Показано, что спектр фотоотклика, возникающего вблизи магнитных полей, соответствующих факторам заполнения уровней Ландау $\nu = 10, 8, 6, 4, 2$, представляет собой узкую линию на частоте циклотронного резонанса, ширина которой возрастает от 2 до 5 см^{-1} с уменьшением фактора заполнения ν , что объясняется «выключением» экранирования флуктуаций потенциала в условиях КЭХ.
2. Продемонстрирована возможность значительной (до 80%) перестройки полос чувствительности приемника на ЦР двумерных электронов в гетероструктуре GaAs/GaAs. Перестройка фотоотклика, возникающего вблизи магнитных полей, осуществляется путем увеличения концентрации двумерных электронов за счет эффекта остаточной проводимости при межзонной подсветке.

3. Обнаружено экспоненциальное возрастание с магнитным полем времени фотоотклика в приемнике на ЦР двумерных электронов в GaAs/AlGaAs в условиях целочисленного КЭХ. Эффект связан с пространственным разделением фотовозбужденных электронов и дырок на уровнях Ландау над и под уровнем Ферми соответственно вследствие захвата на локализованные состояния, возникающие из-за флуктуаций потенциала, что приводит к уменьшению перекрытия их волновых функций, характерным масштабом протяженности которых является магнитная длина. Определен характерный размер флуктуаций потенциала, составляющий 400 – 600 Å.
4. Исследованы спектры примесной ФП, обусловленной фотоионизацией мелких акцепторов в напряженных квантоворазмерных гетероструктурах Ge/GeSi *p*-типа при $T = 4,2$ К с различной величиной упругой деформации. Установлено, что упругая деформация в слоях Ge, являющихся квантовыми ямами для дырок, существенно уменьшает энергию связи мелких акцепторов. В гетероструктуре с узкими квантовыми ямами ($d_{Ge} = 200$ Å) в дополнение к наблюдавшимся ранее линиям ФП, обусловленным фотоионизацией мелких акцепторов, обнаружены переходы с основного состояния акцептора в резонансные состояния, связанные с 2-ой и 3-ей подзонами размерного квантования и попадающие в непрерывный спектр энергий первой подзоны.
5. Методами ЛОВ- и фурье-спектроскопии прослежена эволюция спектров примесной ФП в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами в магнитном поле. В квантующих магнитных полях в спектрах обнаружены 3 линии ФП: переход типа $1s-2p$. (энергия которого слабо зависит от магнитного поля) и переходы $1s-2p_{\pm}$ для примесей, расположенных в центрах квантовых ям и центрах барьерных слоев GeSi.
6. В субмиллиметровом диапазоне длин волн исследованы спектры дифференциального примесного магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi, возникающего вследствие захвата примесными центрами фотовозбужденных носителей. Обнаружено, что ширина линий примесного магнитопоглощения в несколько раз меньше ширины наблюдающихся в той же области спектра длинноволнового пика примесной ФП. В спектрах поглощения обнаружены переходы, связанные с возбуждением мелких акцепторов, расположенных в барьерных слоях GeSi и на гетерогранице.

Цитированная литература

1. Highly sensitive and tunable detection of far-infrared radiation by quantum Hall devices // Y. Kawano, Y. Hisanaga, H. Takenouchi, S. Komiyama // *J. Appl. Phys.* – 2001. Vol.89, No 7, P. 4037-4048.
2. Kawano, Y. Breakdown on the quantized Hall effect in the vicinity of current contact / Y. Kawano, S. Komiyama // *Phys. Rev. B* – 2000. Vol.61, N 1. P. 2931-2938.
3. Levine, B.F. Quantum-well infrared photodetectors / B. F. Levine // *J. Appl. Phys.* – 1993. - Vol. 74, № 8. - P. R1-R81.
4. Ge/Si фотодиоды и фототранзисторы со встроенными слоями квантовых точек Ge для волоконно-оптических линий связи / А. И. Якимов, А. В. Двуреченский, В. В. Кириенко, А. И. Никифоров // *Нанофотоника: Материалы совещания, Нижний Новгород, Россия, 2-6 мая 2004.* – ИФМ РАН, 2004. - С. 133-136.
5. Dependence of electron mobility in modulation-doped GaAs-(AlGa)As heterojunction interfaces on electron density and Al concentration // H. L. Stormer, A. C. Gossard, W. Wiegmann, K. Baldwin // *Appl. Phys. Lett.* 1981. - Vol. 39, № 11. – P. 912-914.

Основные результаты опубликованы в следующих работах

- [A1] Мелкие акцепторы в напряженных гетероструктурах Ge/Ge_{1-x}Si_x с квантовыми ямами. / В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, З. Ф. Красильник и др. // 2-ая российская конф. по физике полупроводников: Тезисы докл., Зеленогорск, Россия, 1996. - Т.2. С. 43.
- [A2] Shallow acceptors in strained MQW heterostructures Ge/GeSi. / V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva, A. L. Korotkov *et al.* // *Nanostructures: physics and technology: Abstr. Intern. Symp., St. Petersburg, Russia, Ioffe Institute, St. Petersburg, 1996.* - P. 420.
- [A3] Far IR spectroscopy of MQW heterostructures Ge/Ge_{1-x}Si_x / V. Ya. Aleshkin, N. A. Bekin, I. V. Erofeeva *et al.* // *Phys. Semicond.: Proc. 23^d Int. Conf., Berlin, Germany, Singapore, World Scientific, 1996.* - Vol. 3. - P. 1907-1910.
- [A4] Far IR impurity photoconductivity in strained MQW Ge/GeSi heterostructures / V. Gavrilenko, I. Erofeeva, A. Korotkov *et al.* // *Inst. Phys. Conf. Ser.: IOP Publishing, Bristol, 1997.* – No 155. Ch. 2. - P. 133-136.
- [A5] Мелкие акцепторы в напряженных многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами. / В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. Л. Коротков и др. // *Письма в ЖЭТФ.* – 1997. – Т. 65, вып. 2. - С. 194-198.
- [A6] Far Infrared Spectroscopy of Strained MQW Ge/GeSi Heterostructures / V. Ya. Aleshkin, N. A. Bekin, I. V. Erofeeva *et al.* // *Semiconductor Device Research: Proceedings Int. Symposium, Charlottesville, USA, 1997.* - P. 319 .

- [A7] Примесная ФП в напряженных гетероструктурах Ge/Ge_{1-x}Si_x с квантовыми ямами. / В.Я.Алешкин, В.И.Гавриленко, И.В.Ерофеева и др. // 3-я Всеросс. конф. по физике полупроводников: Тезисы докладов. Москва, Россия, - С.232.
- [A8] Примесная ФП напряженных многослойных гетероструктур Ge/Ge_{1-x}Si_x. / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Наноструктуры на основе кремния и германия: Материалы всероссийского совещания, Н. Новгород, Россия, 10-13 марта 1998. - ИФМ РАН, 1998. - С. 50-55.
- [A9] Циклотронный резонанс и межподзонные переходы дырок в напряженных многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, Н. А. Бекин, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Наноструктуры на основе кремния и германия: Материалы всероссийского совещания, Н.Новгород, Россия, 10-13 марта 1998. ИФМ РАН, 1998. - С. 112-121.
- [A10] Shallow acceptors in strained Ge/GeSi heterostructures with wide quantum wells / V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva *et al.* // Nanostructures: physics and technology: Proc. 6th Int. Symp., St. Petersburg, Russia, 1998. - P. 473-476.
- [A11] Spectral response of quantum Hall effect far infrared detector / V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva, N. G. Kalugin *et al.* // Nanostructures: physics and technology: Proc. 6th Int. Symp., St. Petersburg, Russia, 1998. - P. 497-499.
- [A12] Far infrared spectroscopy of shallow acceptors in strained Ge/GeSi quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva *et al.* // Shallow-level centers in semiconductors: Programme and Abstracts 8th Int. Conf., Montpellier, France, 1998. - P. 57.
- [A13] Мелкие акцепторы в напряженных гетероструктурах Ge/Ge_{1-x}Si_x. / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // ФТП. – 1998. Т. 32, вып. 10. - С. 1240-1245.
- [A14] Far infrared spectroscopy of shallow acceptors in strained Ge/GeSi quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva *et al.* // Phys. Stat. Sol.(b). – 1998. - Vol. 210. – P.649-653.
- [A15] Shallow acceptors in strained Ge/GeSi quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva *et al.* // 24th Int. Conf. Phys. Semicond.: Abstr., Jerusalem, Israel, 1998. - Vol. 1, Tu-P156.
- [A16] Spectral response of cyclotron resonance quantum Hall effect detector / A. V. Antonov, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Inst. Phys. Conf. – 1999. - Ser. No 162. - P. 111-116.
- [A17] Циклотронный резонанс и межподзонные переходы дырок в напряженных многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, Н. А. Бекин, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Известия АН. Сер. Физическая. – 1999. - Т. 63, № 2. - С. 352-358.

- [A18] Cyclotron resonance quantum Hall effect detector / I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, N. G. Kalugin *et al.* // Solid State Physics & Engineering: Material Science Forum, Switzerland, Trans Tech Publications Ltd., 1999. - Vol. 297-298. - P. 353-356.
- [A19] Spectral response of cyclotron resonance quantum Hall effect detector / A. V. Antonov, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // XIII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников: Тезисы докладов, 15-20 февраля 1999. - Екатеринбург, 1999. - С. 58-59.
- [A20] Циклотронный резонанс двумерных дырок в напряжённых многослойных гетероструктурах Ge/GeSi в квантующих магнитных полях / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 15-18 марта 1999. - ИФМ РАН, 1999. - С. 114-120.
- [A21] Приёмник на циклотронном резонансе двумерных электронов в условиях квантового эффекта Холла / А. В. Антонов, В. Л. Вакс, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 15-18 марта 1999. ИФМ РАН, 1999. - С. 231-234.
- [A22] Мелкие акцепторы в напряженных гетероструктурах с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, Б. А. Андреев, А. В. Антонов, В. И. Гавриленко, Д. М. Гапонова, И. В. Ерофеева и др. // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 15-18 марта 1999. ИФМ РАН, 1999. - С. 274-278.
- [A23] Hole cyclotron resonance in MQW Ge/GeSi heterostructures in quantizing magnetic fields / V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva *et al.* // Nanostructures: Physics and Technology : Abstr. Int. Symp., St. Petersburg, Russia, June, 1999. S-P. 1999. - P. 356-359.
- [A24] Cyclotron resonance of two-dimensional holes in strained multi-quantum-well Ge/GeSi heterostructures / V. Ya. Aleshkin, V. L. Vaks, D. B. Veksler, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva, O. A. Kuznetsov, M. D. Moldavskaya // Proceedings of SPIE, 1999. - Vol. 3828. - P. 342-346.
- [A25] Shallow acceptors in Ge/GeSi multi-quantum-well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, B. A. Andreev, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva *et al.* // Modulated semiconductor structures: Digest of the 9th Int. conference, Fukuoka, Japan, 1999. - P. 289-290.
- [A26] Квантовый циклотронный резонанс двумерных дырок в напряжённых многослойных гетероструктурах Ge/GeSi(111) // В. Я. Алешкин, В. Л. Вакс, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, М. Д. Молдавская, О. А. Кузнецов // IV российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Новосибирск, Россия, 1999. С. 33.
- [A27] Мелкие акцепторы в напряженных гетероструктурах Ge/GeSi / В. Я. Алешкин, Б. А. Андреев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // IV рос-

сийская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Новосибирск, Россия, 1999. - С. 85.

[A28] Фотоотклик приёмника на циклотронном резонансе электронов в условиях квантового эффекта Холла / О. В. Астафьев, В. Л. Вакс, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // IV российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Новосибирск, Россия, 1999. С. 110.

[A29] Циклотронный резонанс двумерных дырок в напряженных многослойных гетероструктурах Ge/Ge_{1-x}Si_x (111) / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Структура и свойства твёрдых тел: Докл. Российской конф., Нижний Новгород, Россия, ННГУ, 1999. - С. 94-96.

[A30] Циклотронный резонанс двумерных дырок в напряжённых многослойных гетероструктурах Ge/GeSi в квантующих магнитных полях / В. Я. Алешкин, В. Л. Вакс, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Известия РАН. Сер. физическая. – 2000. - Т. 64, № 2. - С. 308-312.

[A31] Мелкие акцепторы в напряженных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, Б. А. Андреев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов. // ФТП. – 2000. - Т.34, вып.5 - С. 582-587.

[A32] Shallow acceptors in Ge/GeSi multi-quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, B.A. Andreev, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva *et al.* // Physica E. – 2000. - Vol. 7. - P. 608-611.

[A33] Cyclotron resonance quantum Hall effect detector / B. A. Andreev, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 8th Int. Symp., St Petersburg, Russia, June 19-23, 2000. – Ioffe Institute, St. Petersburg, 2000. - P.53-55.

[A34] Resonant acceptor states in Ge/GeSi MQW heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 8th Int. Symp., St Petersburg, Russia, June 19-23, 2000. - Ioffe Institute, St. Petersburg, 2000. - P. 464-467.

[A35] Перестройка спектральной полосы приёмника на циклотронном резонансе электронов в GaAs/AlGaAs в условиях квантового эффекта Холла // Б. А. Андреев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 20-23 марта 2000. - ИФМ РАН, 2000. - С. 95-99.

[A36] Резонансные состояния акцепторов в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. Я. Алёшкин, Б. А. Андреев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, Д. В. Козлов, О.А. Кузнецов. // Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 20-23 марта 2000. - ИФМ РАН, 2000. - С. 114-117.

[A37] Локализованные и резонансные состояния мелких акцепторов в напряженных многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами /

В. Я. Алешкин, Б. А. Андреев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Нанофизика и нанoeлектроника: Тезисы докл. Второго российско-украинского семинара, Киев, Украина, Институт физики полупроводников НАНУ, 2000. - С. 57-58.

[A38] Resonant acceptor states in Ge/Ge_{1-x}Si_x MQW heterostructures / V. Ya. Aleshkin, B. A. Andreev, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva, D. V. Kozlov and O. A. Kuznetsov // Nanotechnology. – 2000. - Vol. 11, № 4. - P. 348-350.

[A39] Cyclotron resonance of holes and shallow acceptor photoconductivity in strained MQW Ge/GeSi heterostructures in strong magnetic fields / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Phys. Semicond.: Proc. 25th Int. Conf., Osaka, Japan, 2000 (Eds, N.Miura and T.Ando). Springer Proc. in Physics, 2000. - Vol. 87, Part I. - P. 485-486.

[A40] Cyclotron resonance quantum Hall effect detector / B. A. Andreev, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Phys. Semicond.: Proc. 25th Int. Conf., Osaka, Japan, 2000 (Eds, N. Miura and T. Ando). Springer Proc. in Physics, 2000. - Vol. 87, Part II. - P. 949-950.

[A41] Localized and resonant states of shallow acceptors in strained Ge/GeSi MQW heterostructures / V. Ya. Aleshkin, B. A. Andreev, I. V. Erofeeva *et al.* // Phys. Semicond.: Proc. 25th Int. Conf., Osaka, Japan, 2000 (Eds, N. Miura and T. Ando). Springer Proc. in Physics, 2000. - Vol. 87, Part II. - P. 1385-1386.

[A42] Перестройка спектральной полосы приемника на циклотронном резонансе электронов в GaAs/AlGaAs в условиях квантового эффекта Холла / Б. А. Андреев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Известия АН. Сер. физическая. – 2001. - Т. 65, № 2. - С. 233-235.

[A43] Резонансные состояния акцепторов в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, Б. А. Андреев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Известия АН. Сер. физическая. – 2001. - Т. 65, № 2. - С.249-251.

[A44] Cyclotron resonance quantum Hall effect detector / B. A. Andreev, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Semiconductor Science and Technology. – 2001. - Vol. 16. - P.300-303.

[A45] Мелкие акцепторы в гетероструктурах Ge/GeSi в квантующих в магнитных полях / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, О. А. Кузнецов // Нанofотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 26-29 марта 2001. - ИФМ РАН, 2001. – С. 60-63.

[A46] Время отклика прибора на основе квантового эффекта Холла на излучение дальнего ИК диапазона / В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, О. Астафьев и др. // Нанofотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 26-29 марта 2001. - ИФМ РАН, 2001. - С. 196-200.

- [A47] Time constant of far IR response of quantum Hall device / I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, O. Astafiev *et al.* // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 9th Int. Symp., St Petersburg, Russia, 2001. - P. 113-116.
- [A48] Localised and resonant acceptors states in strained Ge/Ge_{1-x}Si_x multiple-quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Modulated Semiconductor Structures: Abstr. 10th Intern. Conf., Linz, Austria, 2001. - P. 222.
- [A49] Водородоподобные акцепторы в гетероструктуре Ge/GeSi в сильных магнитных полях / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, О. А. Кузнецов // V Росс. конф. физ. полупровод.: Тез. Докл., Н.Новгород, Россия, ИФМ РАН, 2001. - Т. 2. - С. 364.
- [A50] Erofeeva, I. V. Time constant of the far IR response of a quantum Hall device / I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko and S. Komiyama // Nanotechnology. – 2001. - Vol. 12, № 2. - P. 453-456.
- [A51] The resonant states of shallow acceptors in multiple-quantum-well Ge/Ge_{1-x}Si_x heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Compound Semiconductors: Abstr. 28th Intern. Symp., 2001, Tokyo, Japan. - 2001. - P. 141.
- [A52] A cyclotron resonance quantum Hall effect detector / B. A. Andreev, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures (ed. V.E.Borisenko, S.V.Gaponenko and V.S.Gurin), Singapore: World Scientific, 2001. - P. 459-462.
- [A53] Рекомбинационное примесное излучение в гетероструктуре p-Ge/GeSi в дальнем ИК диапазоне / В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, Д. В. Козлов и др. // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 11-14 марта 2002. - ИФМ РАН, 2002. - С. 322-325.
- [A54] Время отклика прибора на основе квантового эффекта Холла на излучение дальнего ИК диапазона // О. Астафьев, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Известия РАН. Сер. физическая. – 2002. - Т. 66, № 2. - С. 243-246.
- [A55] Localised and resonant states of shallow acceptors in Ge/Ge_{1-x}Si_x multiple-quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, B. A. Andreev, V. I. Gavrilenko, I. V. Erofeeva, D. V. Kozlov and O. A. Kuznetsov // Physica E. – 2002. - Vol. 13, N 2-4. - P. 317-320.
- [A56] Рекомбинационное примесное излучение в гетероструктуре p-Ge/GeSi в дальнем ИК диапазоне / В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, Д. В. Козлов и др. // Известия АН. Сер. физическая. – 2003. - Т. 67, №2. - С. 183-185.
- [A57] Межподзонный циклотронный резонанс в гетероструктурах Ge/GeSi с широкими квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Нанопотоника: Материалы всероссийского

совещания, Нижний Новгород, Россия, 17-20 марта 2003. - ИФМ РАН, 2003. - Т. 1. - С. 11-15.

[A58] Субмиллиметровое примесное магнитопоглощение в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В.Я.Алешкин, А.В.Антонов, Д.Б.Векслер, В.И.Гавриленко, И.В.Ерофеева, А.В.Иконников, Д.В.Козлов, О.А.Кузнецов // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 17-20 марта 2003. - ИФМ РАН, 2003. - Т. 2. - С. 248-251.

[A59] Intersubband hole cyclotron resonance in Ge/GeSi heterostructures with wide quantum wells / V. Ya. Aleshkin, D. B. Veksler, I. V. Erofeeva *et al.* // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 11th Int. Symp., St Petersburg, Russia, June 23-28, 2003. Ioffe Institute, St. Petersburg, 2003. - P.127-128.

[A60] Submillimeter impurity magnetoabsorption in Ge/GeSi quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 11th Int. Symp., St Petersburg, Russia, June 23-28, 2003. Ioffe Institute, St. Petersburg, 2003. - P. 214-215.

[A61] Far IR magnetoabsorption in Ge/GeS QW structures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // 22nd Int. Conf. on Defects in Semiconductors: Book of Abstracts II, Aarhus, Denmark, 2003. - PA-114.

[A62] Межподзонный ЦР дырок в напряженных гетероструктурах Ge/GeSi с толстыми слоями Ge и ЦР 1L-электронов в слоях GeSi / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // VI Российская конф. по физике полупроводников: Тез. докл., С.-Петербург, Россия, 26 -31 октября 2003. - ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, 2003. - С. 131-132.

[A63] Субмиллиметровое примесное магнитопоглощение в гетероструктурах p-Ge/GeSi с квантовыми ямами / В.Я.Алешкин, А.В.Антонов, Д.Б.Векслер, В.И.Гавриленко, И.В.Ерофеева, А.В.Иконников, Д.В.Козлов, О.А.Кузнецов // VI Российская конф. по физике полупроводников: Тез. докл., С.-Петербург, 26-31 октября 2003.-ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, 2003. - С. 437-438.

[A64] Очень мелкие акцепторные состояния в многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами: A^+ -центры и A^0 -центры с пространственным разделением иона примеси и дырки / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева и др. // Нанопотоника: Мат. Всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2-6 мая 2004. - ИФМ РАН, 2004. - С. 129-131.

[A65] Very shallow acceptor states in Ge/GeSi QW heterostructures: A^+ -centers and "barrier spaced" A^0 -centers / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko *et al.* // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 12th Int. Symp., St Petersburg, Russia, June 21-25, 2004. - Ioffe Institute, St. Petersburg, 2004.- P.302-303.

ЕРОФЕЕВА Ирина Викторовна

**СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ
В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

Автореферат

Подписано к печати 10.05.2006 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105