

*На правах рукописи*

ИКОННИКОВ Антон Владимирович

**ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС  
И ПРИМЕСНОЕ МАГНИТОПОГЛОЩЕНИЕ  
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

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

Автореферат  
диссертации на соискание учёной 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,  
профессор В. И. Гавриленко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор А. А. Ежевский  
кандидат физико-математических наук  
Ю. А. Митягин

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Защита состоится 21 сентября 2006 г. в 14 часов на заседании специализированного 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 “3” августа 2006 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

К. П. Гайкович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Развитие современной полупроводниковой электроники и оптоэлектроники в значительной степени определяется прогрессом в технологии и изучении низкоразмерных гетероструктур. Основными эффектами, за счет которых достигается выигрыш по сравнению с традиционными приборами на основе объемных полупроводников, является пространственное разделение и ограничение носителей, изменение электронного спектра вследствие размерного квантования. Наилучшие результаты получены при использовании гетеропары GaAs/AlGaAs, согласованной по постоянной решетки. Однако внедрение таких элементов в промышленную кремниевую технологию встречается с серьезными трудностями. Это вызывает интерес к гетероструктурам на основе Ge и Si. Поскольку квантовые ямы для дырок в таких структурах всегда образуются в слоях с большим содержанием Ge для создания «дырочных» приборов интересны, прежде всего, гетероструктуры с квантовыми ямами в слоях чистого Ge.

В последние годы отмечается большой интерес к гетероструктурам InAs/AlSb. Квантовая яма для электронов в них оказывается очень глубокой (1,35 эВ), в результате чего в этих структурах всегда присутствует двумерный электронный газ, концентрацию которого при низких температурах можно изменять в широких пределах за счёт эффекта остаточной фотопроводимости. Подвижность электронов в таких структурах достигает  $3 \cdot 10^4$  и  $9 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с при комнатной и низкой температурах соответственно, что позволяет использовать их для создания новых быстродействующих приборов. Такие структуры представляют интерес и для приборов спинтроники, поскольку в них сильно проявляется эффект Рашбы, g-фактор электронов в InAs составляет  $-15$  (в то время как в GaAs  $-0,4$ ).

Эффективным методом исследования полупроводников является метод циклотронного резонанса (ЦР), который даёт информацию об эффективных массах и механизмах рассеяния носителей заряда. До настоящей работы ЦР в гетероструктурах Ge/GeSi исследовался как в селективно легированных образцах, так и в нелегированных структурах при межзонном

оптическом возбуждении носителей [1, 2]. Однако в квантовых магнитных полях исследования были ограничены образцами со сравнительно узкими (до 200 Å) квантовыми ямами Ge. Также, в этих структурах была обнаружена примесная фотопроводимость в дальнем ИК диапазоне [3]. Однако значительная ширина спектральных линий не позволила детально исследовать спектры примесных переходов.

В гетероструктурах InAs/AlSb ЦР исследовался как в слабых [4], так и в квантовых магнитных полях [5, 6]. Исследования проводились на образцах с концентрацией электронов до  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ , что не позволило исследовать закон дисперсии на достаточно большом масштабе энергий. Спектральные исследования остаточной фотопроводимости в этих структурах проводились только в одной работе [7], где исследовались всего два образца в сравнительно узком интервале энергий квантов 1—3 эВ.

В связи с этим проведенное в диссертационной работе исследование циклотронного резонанса и примесного магнитопоглощения в терагерцовом диапазоне в напряженных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами и циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами представляется весьма актуальным.

## **Цели работы**

- установление основных закономерностей циклотронных переходов в валентной зоне напряженных гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами в условиях соизмеримости циклотронной энергии и энергии размерного квантования, а также обнаружение ЦР электронов с целью определения типа гетероперехода;
- разработка метода наблюдения примесного магнитопоглощения при модулированном межзонном оптическом возбуждении электронов и дырок с последующим захватом носителей на ионизованные примесные центры и выявление особенностей энергетических спектров мелких акцепторов в гетероструктурах Ge/GeSi;
- установление природы отрицательной остаточной фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb;
- изучение закона дисперсии электронов в квантовых ямах InAs.

## Научная новизна

1. В спектрах субмиллиметрового магнитопоглощения при межзонном оптическом возбуждении в гетероструктурах Ge/GeSi(111) с широкими слоями Ge впервые обнаружены линии ЦР электронов. Установлено, что они обусловлены 1L электронами в слоях твердого раствора GeSi. Таким образом, прямо показано, что данные гетероструктуры являются структурами II типа в отличие от образцов с более тонкими слоями Ge.
2. В спектрах магнитопоглощения гетероструктур Ge/GeSi с наиболее широкими слоями Ge (800 Å) впервые наблюдались переходы между уровнями Ландау дырок, относящихся к различным подзонам размерного квантования.
3. Впервые исследованы спектры магнитопоглощения гетероструктур Ge/GeSi с остаточными акцепторами при импульсном межзонном оптическом возбуждении носителей. Показано, что релаксация сигнала происходит с двумя характерными временами, соответствующими рекомбинации фотовозбужденных электронов и дырок на нейтральных примесях (быстрое время) и рекомбинации термически возбужденных с очень мелких акцепторов дырок на нейтральных донорах (медленное время). В спектрах магнитопоглощения обнаружены линии, обусловленные переходами типа  $1s \rightarrow 2p_+$  в акцепторах, ионы которых расположены в центре барьерных слоев GeSi, и на гетерограницах, а также ранее не наблюдававшихся центрах, состоящих из иона акцептора в квантовой яме Ge и связанной с ним дырки в соседней квантовой яме.
4. В гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом впервые исследована низкотемпературная остаточная фотопроводимость в широком интервале энергий квантов 0,6—6 эВ. 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 работы

Научная значимость полученных результатов заключается в обнаружении явления межподзонного циклотронного резонанса, являющегося следствием гибридизации волновых функций дырок на уровнях Ландау, относящихся к различным подзонам размерного квантования в гетероструктурах Ge/GeSi, демонстрации нового дифференциального метода наблюдения примесного поглощения и обнаружении новых оптических переходов в очень мелких (энергия связи менее 2 мэВ) акцепторах в гетероструктурах Ge/GeSi. Установлено, что в гетероструктурах InAs/AlSb наблюдаемая отрицательная остаточная фотопроводимость связана с переносом заряда из квантовой ямы InAs на глубокие донорные центры на поверхности покрывающего слоя GaSb. Получены значения эффективных масс электронов на уровне Ферми в квантовых ямах InAs в широком диапазоне концентраций электронов до  $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании электронных и оптоэлектронных приборов на основе квантово-размерных гетероструктур Ge/GeSi и InAs/AlSb.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Многослойные напряжённые гетероструктуры Ge/Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>(111) с малым средним содержанием Si  $\langle x \rangle \leq 0,03$  (т.е. с широкими слоями Ge  $d_{\text{Ge}} \geq 300 \text{ \AA}$ , при  $d_{\text{GeSi}} \sim 200 \text{ \AA}$  и  $x \sim 0,1$ ) являются гетероструктурами II типа, т.е. квантовые ямы для электронов реализуется в слоях твёрдого раствора GeSi, а квантовые ямы для дырок — в слоях Ge в отличие от структур с большим содержанием Si, которые являются гетероструктурами I типа.

2. Гибридизация уровней Ландау дырок в напряжённых гетероструктурах Ge/GeSi приводит к возникновению в спектрах ЦР в квантующих магнитных полях ( $\hbar\omega_c \gg kT$ ) переходов с нижних уровней Ландау, относящихся к 1-ой подзоне размерного квантования, на уровни Ландау вышележащих подзон.

3. Захват неравновесных носителей заряда на ионизованные примесные центры при межзонном оптическом возбуждении приводит к модуляции примесного поглощения в терагерцовом диапазоне и обужению линий

поглощения за счет нейтрализации примесей и уменьшения флуктуаций потенциала. Это явление может быть использовано для спектроскопии мелких примесей в полупроводниковых наноструктурах, где полная концентрация примесей мала.

4. В спектрах дифференциального магнитопоглощения в терагерцовом диапазоне частот при межзонном оптическом возбуждении гетероструктур Ge/GeSi с остаточными примесями наряду с линиями ЦР наблюдаются переходы типа  $1s \rightarrow 2p_+$ , связанные с возбуждением мелких акцепторных центров (энергия связи порядка до 2 мэВ) с пространственным разделением дырки и иона примеси (примесь на гетерогранице, примесь в центре барьера, примесь в соседней квантовой яме). При несимметричном расположении примеси относительно квантовой ямы наблюдаются переходы на  $2p_+$  состояния, связанные с уровнями Ландау не только из 1-й, но и из 2-й подзоны размерного квантования.

5. Отрицательная остаточная проводимость в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом, возникающая при освещении структур видимым светом, связана с захватом фотовозбужденных электронов поверхностными донорами в покрывающем слое GaSb (и рекомбинацией фотовозбужденных дырок с электронами в квантовой яме InAs). Наличие эффектов как отрицательной, так и положительной (наблюдающейся при освещении ИК излучением) остаточной фотопроводимости позволяет обратимым образом в несколько раз изменять концентрацию двумерных электронов.

6. Циклотронная масса электронов в гетероструктурах InAs/AlSb возрастает от  $0,03m_0$  до  $0,06m_0$  при увеличении концентрации электронов в квантовых ямах InAs ( $d_{QW} = 150 \text{ \AA}$ )  $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  вследствие непараболичности закона дисперсии. В квантующих магнитных полях расщепление линии циклотронного резонанса связанное с разностью энергий переходов между уровнями Ландау в 1-ой и 2-ой подзонах размерного квантования может значительно превосходить обусловленное непараболичностью расщепление линии циклотронного резонанса электронов в каждой из подзон.

## **Личный вклад автора**

— Определяющий в проведение измерений спектров циклотронного резонанса электронов и дырок в гетероструктурах Ge/GeSi, обработку и интерпретацию их результатов [A2, A9, A11, A13, A22, A23, A37].

— Основной в проведение измерений спектров примесного магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi с остаточными акцепторами, совместный (с Д. В. Козловым) в обработку и интерпретацию их результатов [A1, A3, A4, A7, A8, A10, A12, A14, A17, A19, A21, A24, A25, A27, A33, A35, A36, A40].

— Равнозначный в подготовку и проведение измерений спектров остаточной фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb, обработку и интерпретацию их результатов (совместно с К. В. Маремьяниным, С. В. Морозовым и Ю. Г. Садофьевым) [A6, A26, A28, A29, A31, A42].

— Определяющий в подготовку и проведение измерений спектров циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом, совместный (с В. Я. Алешкиным и С. С. Криштопенко) в интерпретацию их результатов [A5, A15, A18, A20, A30, A32, A34, A38, A39, A41, A43, A44]

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертации докладывались на 11—14 Международных симпозиумах «Наноструктуры: физика и технология» (2003–2006, С. Петербург), Всероссийских совещаниях «Нанофотоника» (2003, 2004, Н. Новгород), 22-й Международной конференции по дефектам в полупроводниках (2003, Аарус, Дания), 6 и 7 Российских конференциях по физике полупроводников (2003, С.Петербург, 2005, Звенигород), 5 и 6 Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (2003, 2004, С. Петербург), 5-й уральской международной зимней школе по физике полупроводников (2004, Кыштым), 27-й Международной конференции по физике полупроводников (2004, Флагстафф, США), 16-й Международной конференции по сильным магнитным полям в физике полупроводников (2004, Таллахаси, США), 12-м Международном симпозиуме по сверхбыстрым явлениям в



полупроводниках (2004, Вильнюс, Литва), Всероссийских симпозиумах «Нанозифика и нанозлектроника» (2005, 2006, Н.Новгород), 12-й Международной конференции по узкозонным полупроводникам (2005, Тулуза, Франция), а также на семинарах ИФМ РАН и ННГУ.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 44 печатные работы, в том числе 7 статей в реферируемых журналах и 37 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

## **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, и заключения. Объём диссертации составляет 168 страниц, включая 73 рисунка и 4 таблицы. Список цитированной литературы включает 152 наименования, список работ автора по теме диссертации — 44 наименования.

## **Содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана её научная новизна, сформулированы цели работы и приведены положения, выносимые на защиту.

Первые две главы посвящены исследованию гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами, последние две — исследованию структур InAs/AlSb. Первая часть каждой главы представляет собой обзор литературы.

В первом разделе **Главы 1** приведены основные сведения о влиянии деформации на спектры носителей заряда в гетероструктурах Ge/GeSi и дан обзор работ, посвящённых исследованию ЦР носителей заряда в гетероструктурах Ge/GeSi. Во втором разделе Главы 1 кратко описаны процесс роста многослойных гетероструктур Ge/GeSi и методика экспериментального исследования ЦР с использованием генераторов на основе ламп обратной волны (ЛОВ) в качестве источников излучения и возбуждением носителей заряда с помощью межзонной подсветки. Все измерения проводились при  $T = 4,2$  К. Показано, что уровень межзонной подсветки оказывает большое влияние на ширину линий в спектрах ЦР. Уменьшение уровня подсветки позволило значительно обуздить линии и выявить в спектрах ЦР не обнаруженные ранее резонансы. В третьем и

четвёртом разделе Главы 1 представлены результаты измерений ЦР электронов и дырок в напряжённых гетероструктурах Ge/GeSi в диапазоне энергий квантов  $0,5 \div 5$  мэВ ( $f = 125\text{—}1250$  ГГц), а также кратко описан метод расчёта уровней Ландау дырок в этих структурах.

Результаты проведённых исследований показывают, что в гетероструктурах Ge/GeSi с широкими квантовыми ямами Ge (шириной более  $300 \text{ \AA}$ ) наблюдается циклотронный резонанс 1L-электронов с массой  $m^* \approx 0,083m_0$ . Расчёты, проведенные в работе [8] показывают, что 1L-электроны должны находиться в слоях твёрдого раствора GeSi. Таким образом, можно заключить, что такие гетероструктуры (с широкими слоями Ge) являются гетероструктурами II типа.

В структуре с  $d_{Ge} = 800 \text{ \AA}$  в спектрах ЦР обнаружены линии поглощения, обусловленные межподзонным ЦР, т. е. переходами с уровней Ландау первой подзоны размерного квантования на уровни из вышележащих подзон. Наблюдаемые энергии таких переходов хорошо согласуются с данными теоретических расчётов, выполненных Д. В. Козловым.

В первой части **Главы 2** приведён обзор работ, посвящённых теоретическим и экспериментальным исследованиям мелких примесей в гетероструктурах. В следующей части описана дифференциальная методика исследования мелких примесей с помощью ЛОВ при модуляции межзонной подсветки. Приводится сравнение полученных спектров со спектрами фотопроводимости в этих же структурах. Показано, что данная методика позволяет «обузить» линии в спектрах магнитопоглощения и выявить особенности, которые ранее не обнаруживались.

В третьей части приведены результаты исследования магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi, кратко представлен метод расчёта энергий переходов в мелких примесях и проведено сопоставление экспериментальных результатов с результатами расчёта. Представлены различные способы, позволяющие отличать линии, вызванные циклотронными переходами, от линий, обусловленных поглощением на мелких примесях. Показано, что наблюдаемые в гетероструктурах Ge/GeSi «примесные» линии обусловлены переходами типа  $1s \rightarrow 2p_+$  в очень мелких акцепторах, ионы которых расположены в центре барьерных слоев GeSi и на гетеро-

границах. Наиболее мелкие обнаруженные состояния связываются с ранее не наблюдавшимися центрами, состоящими из иона акцептора в квантовой яме Ge, захватившего дырку в соседней квантовой яме (энергия связи порядка 1 мэВ). В структурах с широким квантовыми ямами Ge ( $d_{Ge} \geq 300 \text{ \AA}$ ) для примесей в центре барьера GeSi обнаружены переходы с  $1s$  на  $2p_+$  состояния, связанные с уровнями Ландау как из 1-ой, так и из 2-ой подзон размерного квантования тяжелых дырок.

В четвёртой части Главы 2 представлены методика исследования временных характеристик сигналов магнитопоглощения и результаты измерений, выполненных по данной методике. Показано, что сигнал магнитопоглощения релаксирует после выключения импульса подсветки с двумя характерными временами («быстрое» время варьируется от 10 до 60 мкс для различных образцов, «медленное» — от 40 до 800 мкс).

**Глава 3** посвящена исследованию остаточной фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb, которая может быть как положительной, так и отрицательной. Вначале приведён обзор работ, посвященных исследованию данного явления. Во второй части приведена методика исследования спектров остаточной фотопроводимости гетероструктур InAs/AlSb. В последней части представлены результаты выполненных в диссертации исследований.

В настоящей работе исследования проводились в широком интервале энергий квантов 0,6—6 эВ. Впервые обнаружен резкий спад отрицательной остаточной фотопроводимости в нелегированных структурах при энергии кванта освещения более 3,2 эВ, связываемый «выключением» механизма генерации электронно-дырочных пар, который приводит к уменьшению концентрации двумерных электронов в квантовых ямах InAs. Исследования легированных структур и структур с дополнительным покровным слоем GaAs позволили установить, что отрицательная остаточная фотопроводимость связана с захватом фотовозбуждённых электронов поверхностными донорами в покрывающем слое GaSb.

**Глава 4** начинается с обзора работ, посвященных исследованию ЦР в гетероструктурах InAs/AlSb. Описывается методика исследования ЦР как в слабых, так и в квантующих магнитных полях. В последней части главы

представлены результаты исследований ЦР в данных гетероструктурах и дано краткое описание метода расчёта уровней Ландау электронов, проведенного В. Я. Алешкиным и С. С. Криштопенко.

В слабых магнитных полях обнаружено возрастание эффективной массы от  $0,03m_0$  до  $0,06m_0$  при увеличении концентрации электронов, что обусловлено сильной непараболичностью зоны проводимости. Результаты измерений очень хорошо согласуются с данными теоретических расчетов.

В квантовых магнитных полях ( $\hbar\omega_c \sim E_F$ ) полях обнаружено расщепление линии ЦР. В легированных структурах такое расщепление связано с сильной непараболичностью закона дисперсии электронов. Измеренные значения энергий циклотронных переходов хорошо согласуются с результатами расчётов С. С. Криштопенко. Исследования ЦР в квантовых полях в легированных структурах, в которых заполнены две подзоны размерного квантования, показывают, что в таких структурах наблюдается очень большое расщепление линии ЦР ( $\sim 10\%$ ), что связывается с разницей энергий переходов между уровнями Ландау первой и второй подзоны размерного квантования.

**Заключение** содержит основные результаты, полученные в работе.

### **Основные результаты работы**

1. В спектрах субмиллиметрового (0,6—5 мЭВ) магнитопоглощения напряженных многослойных гетероструктур Ge/GeSi(111) с широкими слоями Ge ( $d_{Ge} = 300—850 \text{ \AA}$ ,  $d_{GeSi} \sim 200 \text{ \AA}$ ) и, соответственно, с малой величиной упругой деформации слоев при межзонном оптическом возбуждении обнаружены линии циклотронного резонанса 1L электронов ( $T = 4,2 \text{ K}$ ). Измеренная величина эффективной массы 1L электронов в слоях GeSi ( $x \sim 0,1$ ) составляет  $m^* \sim (0,083 \pm 0,0005)m_0$ , что превышает соответствующую величину в чистом Ge. Таким образом, прямо показано, что данные гетероструктуры являются структурами II типа в отличие от ранее изученных структур с более тонкими слоями Ge (которые являются квантовыми ямами для 3L электронов), что связано в первую очередь с меньшей величиной упругой деформации слоев.

2. В гетероструктурах Ge/GeSi с различной шириной слоев Ge (квантовых ям для дырок) 120—850 Å исследованы спектры ЦР дырок в квантовых магнитных полях ( $\hbar\omega_c \gg kT$ ) при оптическом межзонном возбуждении носителей. В спектрах наблюдаются две линии ЦР, соответствующие переходам с двух нижних уровней Ландау дырок. Обнаружено, что в образцах с широкими квантовыми ямами ( $d_{Ge} > 300$  Å) энергии переходов нелинейно зависят от магнитного поля, что связано с взаимодействием уровней Ландау первой и вышележащих подзон размерного квантования тяжелых дырок. В образце Ge/GeSi с наиболее широкими квантовыми ямами Ge ( $d_{Ge} = 800$  Å) обнаружено явление межподзонного циклотронного резонанса: в спектрах ЦР наблюдаются линии поглощения, обусловленные переходами носителей с уровней Ландау 1-ой подзоны размерного квантования на уровни Ландау 3-ей и 5-ой подзон. Явление связано с взаимодействием и антипересечением уровней Ландау из разных подзон размерного квантования.

3. Разработан дифференциальный метод наблюдения примесного поглощения в полупроводниковых структурах в терагерцовом диапазоне, основанный на межзонном оптическом возбуждении электронов и дырок и их захвате ионизованными примесями. Достоинством метода применительно к гетероструктурам Ge/GeSi является значительное улучшение линий примесного поглощения (по сравнению со спектрами примесной фотопроводимости в тех же образцах) за счет уменьшения флуктуаций потенциала, что позволило обнаружить новые резонансы поглощения, связанные с возбуждением остаточных мелких акцепторов. Впервые исследованы спектры дифференциального магнитопоглощения Ge/GeSi структур с квантовыми ямами при импульсном межзонном возбуждении носителей. Показано, что релаксация сигнала ЦР и примесного поглощения происходит с двумя характерными временами. Быстрое время (от 10 до 60 пкс) обусловлено рекомбинацией свободных носителей на нейтральных примесях. Медленное время (от 40 до 800 пкс) соответствуют рекомбинации свободных дырок на нейтральных донорах, причем дырки поставляются в валентную зону за счет термической активации с очень мелких акцепторов (с энергией связи порядка 2 мэВ).

4. В спектрах дифференциального магнитопоглощения гетероструктур Ge/GeSi с остаточными примесями в терагерцовом диапазоне частот  $f = 0,3—1,2$  ТГц ( $\hbar\omega = 1—5$  мэВ) обнаружены переходы с основного на возбужденные состояния мелких акцепторов. Для идентификации переходов использовались измерения с временным разрешением при импульсной межзонной подсветке, разогрев носителей постоянным латеральным электрическим полем, измерения при эллиптической (близкой к круговой) поляризации излучения, сопоставление положения наблюдаемых линий с результатами расчетов энергетических спектров примесей. Показано, что наблюдаемые примесные линии обусловлены переходами типа  $1s \rightarrow 2p_+$  в очень мелких акцепторах, ионы которых расположены в центре барьерных слоев GeSi и на гетерограницах. Наиболее мелкие обнаруженные состояния связываются с ранее не наблюдавшимися центрами, состоящими из иона акцептора в квантовой яме Ge, захватившего дырку в соседней квантовой яме (энергия связи  $\sim 1$  мэВ). В структурах с широким квантовыми ямами Ge ( $d_{Ge} \geq 300$  Å) для примесей в центре барьера GeSi обнаружены переходы с  $1s$  на  $2p_+$  состояния, связанные с уровнями Ландау как из 1-ой, так и из 2-ой подзон размерного квантования тяжелых дырок.

5. В широкой области спектра 0,6—6 эВ исследована положительная и отрицательная остаточная проводимость в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом при  $T = 4,2$  К. Установлено, что отрицательная остаточная фотопроводимость, возникающая при освещении структур видимым светом, обусловлена переносом электронов из квантовой ямы InAs на глубокие уровни поверхностных доноров в покрывающем слое GaSb. Наличие эффектов как отрицательной, так и положительной (наблюдающейся при освещении ИК излучением) остаточной фотопроводимости позволяет обратимым образом в несколько раз изменять концентрацию двумерных электронов.

6. Исследованы спектры ЦР в гетероструктурах InAs/AlSb в широком диапазоне концентраций электронов в квантовых ямах InAs от  $2,7 \cdot 10^{11}$  до  $8 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Обнаружено значительное возрастание циклотронной массы от  $0,03m_0$  до  $0,06m_0$ , обусловленное непараболичностью закона дисперсии.

7. В сильных магнитных полях ( $B > 8\text{T}$ ) в селективно легированных гетероструктурах InAs/AlSb с большой концентрацией электронов  $n_s > 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , населяющих как 1-ю, так и 2-ю подзоны размерного квантования, обнаружено сильное расщепление линии ЦР, превышающее расщепление, наблюдаемое в тех же полях в образцах с заполнением только 1-ой подзоны. Показано, что обнаруженное расщепление обусловлено различием энергий переходов между уровнями Ландау в 1-ой и 2-ой подзонах размерного квантования.

### Список цитированной литературы

- [1] Гавриленко, В. И. Циклотронный резонанс носителей заряда в напряжённых гетероструктурах Ge/Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub> / В. И. Гавриленко [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 1994. — Т. 59. — С. 327—330.
- [2] Алешкин, В. Я. Циклотронный резонанс и межподзонные переходы дырок в напряженных многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин [и др.] // Известия Академии наук. Сер. физ. — 1999. — Т. 63. — N. 2. — С. 352—358.
- [3] Гавриленко, В. И. Мелкие акцепторы в напряженных многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. И. Гавриленко [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 1997. — Т. 65. — С. 194—198.
- [4] Gauer, Ch. Energy-dependant cyclotron mass in InAs/AlSb quantum wells / Ch. Gauer [et al.] // Semicond. Sci. Technol. — 1994. — V. 9, N. 9. — P. 1580—1583.
- [5] Yang, M. J. Spin-resolved cyclotron resonance in InAs quantum wells: A study of the energy-dependent  $g$ -factor / M. J. Yang [et al.] // Phys. Rev. B. — 1993. — V. 47. — P. 6807—6810/
- [6] Scriba J. The effect of Landau quantization on cyclotron resonance in a non-parabolic quantum wells / J. Scriba [et al.] // Semicond. Sci. Technol. — 1993. — V. 8, N. 1S. — P. S133—S136.
- [7] Gauer, Ch Photoconductivity in AlSb/InAs quantum wells / Ch. Gauer [et al.] // Semicond. Sci. Technol. — 1993. — V. 8, N. 1S. — P. S137—S140.

[8] Алешкин, В. Я. Спектры электронов и дырок и правила отбора для оптических переходов в гетероструктуре  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x/\text{Ge}$  / В. Я. Алешкин, Н. А. Бекин // ФТП. — 1997. — Т. 31. — С. 171—178.

### **Основные публикации автора по теме диссертации**

[A1] Алешкин, В. Я. Переходы с участием мелких примесей в спектрах субмиллиметрового магнитопоглощения в напряженных квантоворазмерных гетероструктурах  $\text{Ge}/\text{GeSi}(111)$  / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов // ФТТ. — 2004. — Т. 46, вып. 1. — С. 131—137.

[A2] Алешкин, В. Я. Межподзонный циклотронный резонанс дырок в напряженных гетероструктурах  $\text{Ge}/\text{GeSi}(111)$  с широкими квантовыми ямами  $\text{Ge}$  и циклотронный резонанс  $1L$ -электронов в слоях  $\text{GeSi}$  / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов // ФТТ. — 2004. — Т. 46, вып. 1. — С. 126—130.

[A3] Aleshkin, V. Ya. Far IR magnetoabsorption in  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  multiple-quantum-well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, D. V. Kozlov, O. A. Kuznetsov, D. B. Veksler // Physica B. — 2003. — V. 340—342. — P. 840—843.

[A4] Алешкин, В. Я. Мелкие акцепторы в гетероструктурах  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  с квантовыми ямами в магнитном поле / В. Я. Алешкин, А. В. Антонов, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов, К. Е. Спирин // ФТТ. — 2005. — Т. 47, вып. 1. — С. 74—79.

[A5] Алешкин, В. Я. Циклотронный резонанс в легированных и нелегированных гетероструктурах  $\text{InAs}/\text{AlSb}$  с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников, Ю. Г. Садофьев, J. P. Bird, S. R. Johnson, Y.-H. Zhang // ФТП. — 2005. — Т. 39, вып. 1. — С. 71—75.

[A6] Алешкин, В. Я. Спектры остаточной фотопроводимости в гетероструктурах  $\text{InAs}/\text{AlSb}$  с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, Д. М. Гапонова, А. В. Иконников, К. В. Маремьянин,



С. В. Морозов, Ю. Г. Садофьев, S. R. Johnson, Y.-H. Zhang // ФТП. — 2005. — Т. 39, вып. 1. — С. 30—34.

[A7] Aleshkin, V. Ya. THz spectroscopy of extremely shallow acceptors states in Ge/GeSi multiple-quantum-well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, D. V. Kozlov, O. A. Kuznetsov, D. B. Veksler // Acta Physica Polonica A. — 2005. — V. 107. — P. 137—141.

[A8] Aleshkin, V. Ya. Submillimeter impurity magnetoabsorption in Ge/GeSi quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, D. V. Kozlov, O. A. Kuznetsov, D. B. Veksler // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 22—28, 2003. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2003. — P. 214—215.

[A9] Aleshkin, V. Ya. Intersubband hole cyclotron resonance in Ge/GeSi heterostructures with wide quantum wells / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, D. V. Kozlov, O. A. Kuznetsov, D. B. Veksler // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 22—28, 2003. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2003. — P. 127—128.

[A10] Алешкин, В. Я. 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 // Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 17—20 марта 2003. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2003. — Т. 2. — С. 248—251.

[A11] Алешкин, В. Я. Межподзонный циклотронный резонанс в гетероструктурах Ge/GeSi с широкими квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, А. В. Антонов, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов // Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 17—20 марта 2003. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2003. — Т. 1. — С. 11—15.

[A12] Aleshkin, V. Ya. Far IR magnetoabsorption in Ge/GeSi QW structures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, D. V. Kozlov, O. A. Kuznetsov, D. B. Veksler // 22<sup>th</sup> Int. Conf. on defects in

semiconductors: Book of Abstracts II, Aarhus, Denmark, July, 27—August, 1. — 2003. — PA 114.

[A13]Алешкин, В. Я. 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, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов // VI Российская конференция по физике полупроводников: Тез. докл., Санкт-Петербург, Россия, 27—31 октября 2003. — СПб: ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2003. — С. 131—132.

[A14]Алешкин, В. Я. Субмиллиметровое примесное магнитопоглощение в гетероструктурах p-Ge/GeSi с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов // VI Российская конференция по физике полупроводников: Тез. докл., Санкт-Петербург, Россия, 27—31 октября 2003. — СПб: ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2003. — С. 437—438.

[A15]Алешкин, В. Я. Циклотронный резонанс в легированных и нелегированных гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников [и др.] // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2—6 мая 2004. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. — С. 378—382.

[A16]Алешкин, В. Я. Спектры остаточной фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников [и др.] // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2—6 мая 2004. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. — С. 178—186.

[A17]Алешкин, В. Я. 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, А. В. Иконников, Д. В. Козлов // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2—6 мая 2004. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. — С. 129—132.

- [A18]Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of doped and undoped InAs/AlSb QW heterostructures / A. V. Ikonnikov, V. I. Gavrilenko, Yu. G. Sadofyev [et al.] // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 12<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 21—25, 2004. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2004. — P. 280—281.
- [A19]Aleshkin, V. Ya. 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, A. V. Ikonnikov, D. V. Kozlov, O. A. Kuznetsov D. B. Veksler // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 12<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 21—25, 2004. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2004. — P. 302—303.
- [A20]Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of doped and undoped InAs/AlSb QW heterostructures / A. V. Ikonnikov, V. I. Gavrilenko, Yu. G. Sadofyev [et al.] // 27<sup>th</sup> Int. Conf. on the physics of semiconductors: Proc., Flagstaff, Arizona, USA, July 26—30, 2004. — P. 333.
- [A21]Ikonnikov, A. V.  $A^+$ -centers and barrier-spaced  $A^0$ -centers in Ge/GeSi MQW heterostructures / A. V. Ikonnikov, I. V. Erofeeva, D. V. Kozlov [et al.] // 27<sup>th</sup> Int. Conf. on the physics of semiconductors: Abstr., Flagstaff, Arizona, USA, July 26—30, 2004. — P. 252.
- [A22]Ikonnikov, A. V. Intersubband hole cyclotron resonance in strained Ge/GeSi MQW heterostructures / A. V. Ikonnikov, I. V. Erofeeva, D. V. Kozlov [et al.] // 27<sup>th</sup> Int. Conf. on the physics of semiconductors: Abstr., Flagstaff, Arizona, USA, July 26—30, 2004. — P. 258.
- [A23]Ikonnikov, A. V. Terahertz spectroscopy of strained MQW Ge/GeSi heterostructure in high magnetic fields / A. V. Ikonnikov, I. V. Erofeeva, D. V. Kozlov [et al.] // High Magnetic Fields in Semiconductor Physics: Abst. of 16th Int. Conf., Tallahassee, FL, USA, August 2—6, 2004. — P. Thu8.
- [A24]Aleshkin, V. Ya. THz spectroscopy of extremely shallow acceptor states in Ge/GeSi multiply-quantum-well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, D. V. Kozlov, O. A. Kuznetsov, D. B. Veksler // 12<sup>th</sup> Int. Symp. on Ultrafast Phenomena in Semiconductors: Abst., Vilnius, Lithuania, August, 22—25, 2004. — P. 30.

[A25]Алешкин, В. Я. Примесное магнитопоглощение гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами в квантующих магнитных полях / В. Я. Алешкин, А. В. Антонов, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов, К. Е. Спиринов // Нанопластика и нанополупроводники: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2005. — Нижний Новгород: ИФМ РАН 2005. — С. 397—398.

[A26]Алешкин, В. Я. Природа отрицательной остаточной фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников [и др.] // Нанопластика и нанополупроводники: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2005. — Нижний Новгород: ИФМ РАН 2005. — С. 433—434.

[A27]Ikonnikov, A. V. Differential shallow impurity absorption in Ge/GeSi QW heterostructures in THz range at pulsed bandgap photoexcitation / A. V. Ikonnikov, K. E. Spirin, O. A. Kuznetsov [et al.] // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 20—25, 2005. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2005. — P. 246—247.

[A28]Gavrilenko, V. I. Positive and negative persistent photoconductivity in InAs/AlSb QW heterostructures: control of 2DEG concentration and built-in electric field / V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, K. V. Maremyanin [et al.] // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 20—25, 2005. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2005. — P.396—398.

[A29]Maremyanin, K. V. Spectral study of persistent photoconductivity in InAs/AlSb QW heterostructures / K. V. Maremyanin, A. V. Ikonnikov, S. V. Morozov [et al.] // Narrow Gap Semiconductors: Abstr. of 12<sup>th</sup> Int. Conf. Toulouse, France, July 3—7, 2005. — P. 21.

[A30]Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of InAs/AlSb QW heterostructures / A. V. Ikonnikov, V. I. Gavrilenko, Yu. G. Sadofyev [et al.] // Narrow Gap Semiconductors: Abstr. of 12<sup>th</sup> Int. Conf. Toulouse, France, July 3—7, 2005. — P. 101.

[A31]Гавриленко, В. И. Положительная и отрицательная остаточная фотопроводимость в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами / В. И. Гавриленко, А. В. Иконников, К. В. Маремьянин [и др.] // VII Росс.

конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18—23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С. 99.

[A32]Гавриленко, В. И. Исследование циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами / В. И. Гавриленко, А. В. Иконников, Ю. Г. Садофьев [и др.] // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18—23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С. 185.

[A33]Алешкин, В. Я. Дифференциальное примесное магнитопоглощение в ТГц-диапазоне в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами при импульсном межзонном возбуждении / В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников [и др.] // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18—23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С. 197.

[A34]Антонов, А. В. Терагерцовое излучение из квантовых ям InAs/AlSb / А. В. Антонов, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников [и др.] // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18—23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С.230.

[A35]Алешкин, В. Я. Примесное поглощение гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами в квантующих магнитных полях / В. Я. Алешкин, А. В. Антонов, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов, К. Е. Спирин // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18—23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С. 307.

[A36]Ikonnikov, A. V.  $A^+$ -centers and “barrier-spaced”  $A^0$ -centers in Ge/GeSi MQW heterostructures / A. V. Ikonnikov, I. V. Erofeeva, D. V. Kozlov [et al.] // AIP Conf. Proc. — 2005. — V. 772. — P. 947—948.

[A37]Ikonnikov, A. V. Intersubband hole cyclotron resonance in strained Ge/GeSi MQW heterostructures / A. V. Ikonnikov, I. V. Erofeeva, D. V. Kozlov [et al.] // AIP Conf. Proc. — 2005. — V. 772. — P. 949—950.

[A38]Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of doped and undoped InAs/AlSb QW heterostructures / A. V. Ikonnikov, V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko [et al.] // AIP Conf. Proc. — 2005. — V. 772. — P. 1214—1215.

- [A39]Алешкин, В. Я. Исследование циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами в квантующих магнитных полях / В. Я. Алешкин, Ю. Б. Васильев, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников, С. С. Криштопенко, Ю. Г. Садофьев, М. L. Sadowski, W. Кнар, S. R. Johnson, Y.-H.Zhang // Нанозифика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2006. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. — Т. 1. — С. 86—87.
- [A40]Алешкин, В. Я. Исследование примесного магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi при импульсном фотовозбуждении / В. Я. Алешкин, А. В. Иконников, В. И. Гавриленко [и др.] // Нанозифика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2006. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. — Т. 2. — С. 328—329.
- [A41]Гавриленко, В. И. Осцилляции субмиллиметровой фотопроводимости в нелегированных гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом / В. И. Гавриленко, А. В. Иконников, С. С. Криштопенко [и др.] // Нанозифика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2006. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. — Т. 2. — С. 439 — 440.
- [A42]Marem'yanin, K. V. Spectral study of persistent photoconductivity in InAs/AlSb QW heterostructures / K. V. Marem'yanin, K. E. Spirin, A. V. Ikonnikov [et al.] // Narrow Gap Semiconductors, Institute of Physics Conference Series No. 187. — New York, 2006. — P. 137—142.
- [A43]Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of InAs/AlSb QW heterostructures / A. V. Ikonnikov, S. S. Krishtopenko, K. E. Spirin [et al.] // Narrow Gap Semiconductors, Institute of Physics Conference Series No. 187. — New York, 2006. — P. 579—584.
- [A44] Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of InAs/AlSb QW heterostructures in quantizing magnetic fields / A. V. Ikonnikov, Yu. B. Vasilyev, S. S. Krishtopenko [et al.] // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 14<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 26—30, 2006. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2006. — P. 172—173.

ИКОТНИКОВ Антон Владимирович

**ЦИКЛОТРОТНЫЙ РЕЗОНАНС И ПРИМЕСНОЕ МАГНИТОПОГЛОЩЕНИЕ  
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

Автореферат

Подписано к печати 28.07.2006 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105