

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*

ВАСИЛЬЕВСКИЙ Иван Сергеевич

ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В  
СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ  
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaAs}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$

Специальность 01.04.09 –

Физика низких температур

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

МОСКВА – 2006

Работа выполнена на кафедре физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор **Кульбачинский Владимир  
Анатольевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор **Звягин Игорь Петрович**;  
кандидат физико-математических наук,  
заведующий лабораторией  
**Аронзон Борис Аронович**

Ведущая организация: ФИАН им. П.Н. Лебедева  
г. Москва

Защита состоится “08” июня 2006 года в \_16:00\_ на заседании Диссертационного совета Д.501.001.70 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, криогенный корпус, аудитория 2-05а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан “\_05\_” \_мая\_\_\_ 2006 года

Ученый секретарь Диссертационного  
совета Д.501.001.70 МГУ им. М.В. Ломоносова  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Г.С. ПЛОТНИКОВ**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Квантовые ямы (КЯ) на основе полупроводников  $A^{III}B^V$  представляют собой весьма интересные объекты исследований. С помощью современных технологий удается получать многослойные структуры с контролируемым составом и толщиной слоев, что позволяет конструировать параметры зонной структуры и энергетический спектр носителей тока. В квантовых ямах, вследствие ограничения носителей тока в узком слое, проявляется эффект размерного квантования, обуславливающий новые свойства двумерных носителей тока. Исследование свойств структур с квантовыми ямами весьма перспективно как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. В настоящее время такие структуры широко используются для создания фотодетекторов, лазеров, оптических модуляторов, мощных быстродействующих транзисторов. Исследуются особенности энергетического спектра носителей тока и оптические свойства, связанные с эффектом размерного квантования, явления туннелирования при транспорте тока поперек слоев структуры, различные механизмы рассеяния и их вклад в подвижность двумерных носителей тока. В подобных структурах обнаружены качественно новые явления, такие как целочисленный и дробный квантовый эффект Холла в квантующих магнитных полях при низких температурах. Кроме того, при низких температурах и в неквантующих магнитных полях интенсивно изучается влияние квантовых поправок к проводимости на транспорт носителей тока. Интерференционная квантовая поправка обусловлена интерференцией носителей тока при их движении с возвратом к некоторой исходной точке (на траекториях с самопересечением). Величина поправки зависит от соотношения неупругих и упругих актов рассеяния на актуальной траектории. Анализ температурных зависимостей сопротивления и магнетосопротивления позволяет установить время неупругой релаксации фазы, а также изучать процессы рассеяния носителей тока с релаксацией спина. Однако, большинство исследователей используют упрощенные формулы для описания зависимости интерференционной квантовой поправки от магнитного поля, справедливые в слабых магнитных полях, в пределах диффузионного движения носителей.

В структурах со связанными квантовыми ямами возможен отдельный захват электронов и оптических фононов, так как электроны захватываются в потенциальной яме, а фононы - в гетерослоях различных полупроводниковых материалов. В ряде теоретических работ предсказывается изменение электрон-фононного рассеяния в связанных квантовых ямах, образованных при введении в КЯ тонких гетерослоев. Это может при определенных параметрах КЯ приводить как к уменьшению, так и к увеличению подвижности электронов. Для оценки эффекта влияния вставок в КЯ тонких гетерослоев необходимо также учитывать их влияние на зонную структуру, так как большинство гетероматериалов создают дополнительный потенциальный барьер или потенциальную яму в КЯ. Несмотря на обилие теоретических работ, посвященных этой проблеме, детального исследования латерального транспорта электронов в связанных КЯ до сих пор не было проведено.

**Объекты исследования.** В работе исследованы образцы с гетероструктурными квантовыми ямами (КЯ) двух типов, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Это КЯ  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$  (I тип) и  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{GaAs}$  (II тип) на подложках GaAs. Исследовались структуры с дополнительно выращенным в центре КЯ тонким слоем другого материала: барьер AlAs создает связанные квантовые ямы, вставка  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  образует ступенчатую квантовую яму. Для сравнительного анализа исследовались также структуры с одиночной КЯ соответствующей ширины. В образцах первого типа использовалось модулированное легирование, в образцах второго типа – дельта-легирование кремнием для создания электронной проводимости. В образцах изменялись ширина квантовой ямы и концентрация легирования кремнием.

**Целью работы является:** Установить эффективность влияния тонких слоев (барьера AlAs или потенциальной ямы  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ ) в квантовых ямах различной ширины на зонную структуру и транспортные свойства электронов. Для сравнительного анализа исследовать структуры «КЯ с барьером» и «одиночная КЯ». Исследовать температурные зависимости сопротивления и подвижности электронов в изучаемых структурах.

Для определения концентраций электронов в подзонах размерного квантования, их квантовой подвижности, исследовать осцилляции

магнетосопротивления в квантующем магнитном поле при низких температурах (эффект Шубникова-де Гааза).

Исследовать отрицательное магнетосопротивление при низких температурах в области проявления квантовых поправок к проводимости. Сравнить применимость различных подходов к описанию отрицательного магнетосопротивления: теорию слабой локализации в диффузионном приближении и за диффузионным пределом.

Исследовать плавную составляющую магнетосопротивления в таком магнитном поле, в котором интерференционная квантовая поправка мала, а квантовые осцилляции еще не проявляются.

Для анализа зонной структуры образцов изучить спектры фотолюминесценции и фотоотражения в структурах со связанными квантовыми ямами, провести сравнение этих экспериментальных данных с самосогласованным расчетом зонной структуры.

**Положения, выносимые на защиту**

- 1) Обнаружен эффект увеличения подвижности электронов в узких КЯ и уменьшения подвижности в широких КЯ  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$  при введении тонкого барьера AlAs в центр КЯ. Эффект изменения подвижности обусловлен изменением пространственного профиля электронных волновых функций и эффективной ширины КЯ при введении барьера, что приводит к изменению форм-фактора рассеяния на оптических и акустических фонах.
- 2) В мелких квантовых ямах  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{GaAs}$  введение тонкого центрального барьера AlAs уменьшает подвижность и изменяет характер ее температурной зависимости. Барьер существенно изменяет пространственную конфигурацию волновых функций, приводя к образованию гибридных состояний и изменению доминирующего механизма рассеяния. Из анализа температурных зависимостей подвижности и сравнения их с расчетом показано, что в одиночной КЯ доминирует рассеяние на акустических и оптических фонах, а в КЯ с барьером AlAs - рассеяние на ионизированной примеси.
- 3) В сильнолегированных КЯ  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{GaAs}$  обнаружено уменьшение концентрации электронов при введении барьера AlAs, в подзоне КЯ с высокой

подвижностью. Показано, что при введении барьера подвижность электронов в подзоне КЯ уменьшается незначительно из-за эффективного экранирования рассеяния на ионизированных примесях, а в подзонах дельта-слоев - увеличивается.

4) При введении в центр КЯ GaAs/In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As/GaAs тонкой вставки In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As с высоким содержанием In наблюдается сильное уменьшение подвижности электронов. Показано, что в этом случае волновая функция электронов сильно сжимается, и эффективная ширина квантовой ямы уменьшается. При этом растет рассеяние на шероховатостях границ и флуктуациях состава вставки In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As.

5) Разработан эффективный метод расчёта интерференционной квантовой поправки к проводимости, применимый как в диффузионном приближении, так и за диффузионным пределом. Метод основан на использовании установленной с помощью расчетов аналитической формулы для асимптотики интеграла, входящего в сумму ряда для вычисления поправки. Экспериментальные данные описываются расчетными зависимостями в широком интервале магнитных полей. Показано, что при наличии слабой спиновой релаксации из анализа экспериментальных данных определяется эффективное значение параметра неупругой релаксации фазы, которое связано с его истинным значением и параметром спиновой релаксации.

### **Научная новизна**

Проведено систематическое исследование транспортных свойств электронов в квантовых ямах при введении в центр квантовой ямы тонких гетерослоев – потенциальных барьеров и вставок более глубокой узкой потенциальной ямы – в широком интервале температур и магнитных полей с одновременным экспериментальным исследованием качества гетерограниц и ширины вставок с помощью масс-спектропии вторичных ионов (ВИМС) и рентгеновской дифрактометрии (ДРД). Исследованы низкотемпературная фотолюминесценция, фотоотражение, транспорт и магнетотранспорт как в слабых магнитных полях, так и в квантовых.

Проведены расчеты зонных диаграмм структур и волновых функций электронов, а также расчеты подвижности электронов для различных механизмов

рассеяния и влияния на нее барьеров и вставок и сравнение с экспериментальными данными.

Впервые разработан единый эффективный метод расчета интерференционной квантовой поправки к проводимости в широком интервале магнитного поля и параметра неупругой релаксации фазы. Получены аппроксимации, существенно упрощающие численные расчеты при сохранении высокой точности. Показано, что разработанный метод позволяет хорошо описать экспериментальные данные по отрицательному магнетосопротивлению за диффузионным пределом.

### **Практическая значимость**

Результаты работы можно использовать при проектировании оптимизированных структур с высокой подвижностью и, одновременно, концентрацией двумерного газа. В работе показано, что эффект введения тонкого потенциального барьера AlAs оказывается различным в различных структурах, с учетом реального профиля зоны проводимости. Тонкие гетерослои, дополнительно выращиваемые в квантовой яме (барьер или потенциальная вставка) дают возможность эффективно влиять на энергетический спектр и волновые функции электронов. В мелких КЯ GaAs/In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As/GaAs введение барьера AlAs позволило существенно увеличить энергию оптических переходов без ухудшения интенсивности фотолюминесценции. Результаты по получению заданных оптических свойств гетероструктурных квантовых ям имеют важное значение для детектирования света различного диапазона и лазерной генерации.

**Апробация работы.** Основные результаты данной работы докладывались на научных конференциях: Всероссийской Научной Конференции Студентов-Физиков 8, 2002, (Екатеринбург), диплом 1<sup>й</sup> степени; Международной Конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «ЛОМОНОСОВ-2002» (Москва); International Symposium on Nanostructures Nano-2003, (St. Petersburg); XXXIII совещании по физике низких температур, НТ-33, 2003 (Екатеринбург); VI Российской конференции по физике полупроводников, 2003 (Санкт-Петербург); International Workshop on Modulation Spectroscopy of Semiconductor Structures, 2004 (Wroclaw); Международной Конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «ЛОМОНОСОВ-2004»

(Москва); International Symposium on Nanostructures Nano-2004 (St. Petersburg); VII Российской конференции по физике полупроводников, 2005 (Москва); International Conference on Micro- and Nanoelectronics, ICMNE-2005, Звенигород, 2005; 5-й Национальной Конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследований наноматериалов и наносистем, РСНЭ-НАНО 2005, (Москва); 7-й молодежной конференции по физике полупроводников и оптоэлектронике, 2005, (Санкт-Петербург), диплом 2<sup>й</sup> степени.

**Публикации.** Содержание работы отражено в 21 публикации. Список работ приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы из 190 наименований. Диссертация содержит 182 страницы, включая 81 рисунок и 16 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность тематики диссертационной работы, описаны изучаемые объекты исследования, сформулированы цели и задачи работы, методы исследования, новизна и практическая значимость работы, а также выносимые на защиту положения. Приводятся сведения об апробации и список публикаций по теме работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы по физическим свойствам квантовых ям на основе соединений  $A^{III}B^V$ . Представлены основные теоретические и экспериментальные данные об энергетическом спектре электронов в квантовых ямах, структуре двумерных подзон, механизмах рассеяния двумерных электронов, электронном транспорте как в слабых, так и в квантующих магнитных полях.

Описывается влияние тонкого барьера AlAs в квантовой яме на энергетический спектр, потенциалы оптических фононов (в модели диэлектрического континуума) и на подвижность электронов при различной ширине КЯ. Также рассматриваются механизмы рассеяния на ионизированных примесях и шероховатостях гетерограниц. Кратко описано применение структур в КЯ в новых приборах электроники и оптоэлектроники.



Во **второй главе** описано изготовление, строение и структурная характеристика изучаемых образцов, а также методики их исследования. Описано исследование толщин и состава слоёв структур методами масс-спектропии вторичных ионов, рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии. Рассказывается об использованных в работе методиках измерений температурных зависимостей сопротивления, магнетосопротивления и эффекта Холла. Приводится описание методик исследования гальваномагнитных эффектов при низких температурах, в том числе описаны две созданные установки для измерения температурных зависимостей гальваномагнитных эффектов. Описываются методики получения спектров фотолюминесценции и фотоотражения, схемы соответствующих экспериментальных установок.

Ширина КЯ в образцах первого типа равнялась 13, 26 и 35 нм, а толщина барьера AlAs – 1.8 нм. Структуры были двусторонне модулированно-легированы кремнием. Ширина КЯ образцов второго типа равнялась 16 нм и 11 нм, барьера AlAs - 1 нм, вставки  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  - 1 нм. Образцы имели двустороннее дельта-легирование через спейсеры 8.5 нм. В сильнолегированных образцах концентрация легирования была в 3 раза больше, чем в умеренно легированных.

**Третья глава** посвящена исследованию зонной структуры и оптических свойств квантовых ям  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaAs}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ . Для исследованных образцов определены пространственные профили зоны проводимости /валентной зоны, огибающих волновых функций (ВФ) электронов /дырок, размерно-квантованные уровни энергии, концентрация электронов в подзонах размерного квантования, с помощью решения самосогласованной системы уравнений Шредингера и Пуассона. Показано, что из-за изгиба дна квантовой ямы вследствие электростатического потенциала распределенных зарядов, центральный барьер AlAs приводит к качественно различному изменению зонной структуры: в узкой КЯ  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  – к расщеплению подзоны КЯ на дублет с симметричной и антисимметричной волновыми функциями, а в широкой – к локализации волновых функций в отдельные половины КЯ без значительного изменения энергии подзон.

В мелких и узких КЯ GaAs/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As/GaAs (образцы второго типа), барьер AlAs приводит к увеличению уровней энергии подзон КЯ и уровня Ферми. Это приводит к образованию гибридных состояний с ВФ, распределенной как в КЯ, так и в легированных δ-слоях. Для сильнолегированных образцов профиль зоны проводимости и волновые функции показаны на Рис. 1, образец 1 - с одиночной КЯ, образец 2 - с барьером AlAs. С помощью анализа спектров

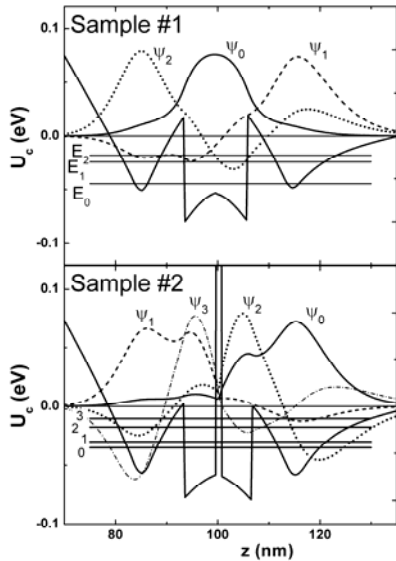


Рис. 1. Зона проводимости и волновые функции электронов в сильнолегированных образцах GaAs/In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As/GaAs

фотолюминесценции при T=77 К показано, что введение даже столь тонкого барьера AlAs приводит к увеличению энергии оптических переходов из-за увеличения энергии уровней размерного квантования. Сравнение энергии переходов, наблюдаемых на спектрах фотоотражения при комнатной температуре, с данными расчета позволило изучить влияние концентрации легирования кремнием на зонную структуру и оптические переходы в образцах первого типа. С ростом уровня легирования профиль зон распрямляется, и переходы между верхними дырочными и нижними электронными подзонами усиливаются из-за растущего перекрытия волновых функций.

В четвёртой главе описывается электронный транспорт в квантующих магнитных полях при низких температурах в исследованных структурах. Изучались осцилляции Шубникова – де Гааза (ШдГ) и квантовый эффект Холла при температурах 0.25 – 4.2 К. По Фурье-спектрам осцилляций ШдГ определены концентрации электронов с высокой подвижностью в подзонах размерного квантования и значения квантовой подвижности. Экспериментальные данные интерпретируются при сравнении рассчитанных в главе 3 и измеренных концентраций электронов в подзонах. В образцах первого типа наблюдается несколько частот осцилляций ШдГ, соответствующих нескольким заполненным подзонам размерного квантования. С ростом ширины КЯ частота (и концентрация в подзоне) увеличивается. В сильнолегированных образцах второго типа введение барьера AlAs существенно уменьшает концентрацию электронов в подзоне с

высокой подвижностью, тогда как в умеренно легированных она уменьшается незначительно. Анализ зонной структуры показывает, что в образце 2 с барьером наблюдаемая в эффекте ШдГ концентрация соответствует электронам гибридной подзоны с номером 2 (рис. 1). В образцах второго типа исследован диамагнитный эффект ШдГ в сильном параллельном двумерному газу магнитном поле для определения концентрации электронов в верхних подзонах, имеющих более низкую подвижность электронов.

В пятой главе описывается электронный транспорт в слабом магнитном поле: исследования температурных зависимостей сопротивления и холловской подвижности и анализ влияния барьера AlAs или вставки  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  на электронные транспортные свойства.

Во всех образцах первого типа наблюдается близкое к линейному уменьшение сопротивления, и увеличение подвижности при уменьшении температуры. При низких температурах небольшое возрастание сопротивления соответствует проявлению квантовых поправок к проводимости.

Введение барьера неоднозначно влияет на подвижность электронов: в узкой КЯ 13 нм подвижность увеличивается (обр. 2-3), в КЯ шириной 26 нм - несколько уменьшается (обр. 4-5), а в широкой КЯ 35 нм - уменьшается (обр. 6-7, см. Рис. 2). Влияние барьера на подвижность сохраняется в широком температурном интервале.

Во всех образцах второго типа введение барьера AlAs толщиной 1 нм приводит к уменьшению холловской подвижности. Кроме того, сопротивление увеличивается, а подвижность уменьшается при понижении температуры, тогда как в образцах с одиночной КЯ подвижность увеличивается при уменьшении температуры. В одиночных КЯ электроны локализованы в области КЯ и имеют высокую подвижность при низких температурах. Барьер приводит к образованию гибридной волновой функции, амплитуда которой распределена как в области КЯ, так и в области дельта-слоя, и подвижность уменьшается за счет рассеяния на

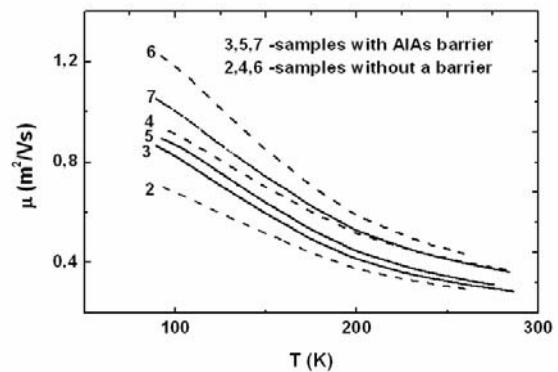


Рис. 2. Температурные зависимости холловской подвижности в образцах с КЯ  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$

ионизированных примесях (ИП). Расчет подвижности электронов при рассеянии на ИП, проведенный на основе данных о зонной структуре и ВФ, подтверждает, что в образцах второго типа с барьером AlAs рассеяние на ИП определяет низкую подвижность электронов. В сильнолегированных образцах заполнены несколько подзон (см. Рис. 1). Введение барьера приводит к перераспределению электронной плотности: в подзонах дельта-слоев (Рис. 1, подзоны номер 1 и 2 в обр. 1, 0 и 1 в обр. 2) концентрация и подвижность электронов возрастает, а в подзонах КЯ - уменьшаются (номер 0 в обр. 1, номера 2 и 3 в обр. 2). Расчет рассеяния на ИП показывает, что наибольшую подвижность в обр. 2 имеют электроны гибридной подзоны КЯ с номером 2. В гибридных подзонах подвижность остается высокой из-за эффективного экранирования кулоновского потенциала ИП электронами, заполняющими подзоны в дельта-слоях.

Тонкая вставка 1 нм  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  в центре КЯ  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{GaAs}$  приводит к сильному увеличению сопротивления и уменьшению подвижности электронов. Сопротивление образца возрастает при понижении температуры, причем логарифмический спад проводимости соответствует вкладу квантовых поправок к проводимости, которые в этом случае определяют температурную зависимость сопротивления. Расчет зонной структуры показал, что тонкая потенциальная яма, образованная вставкой  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ , приводит к сжатию ВФ в центре КЯ, что уменьшает эффективную ширину КЯ. В столь тонком слое  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  велики флуктуации состава и толщины слоя, что приводит к низкой подвижности электронов в данном образце.

В **шестой главе** описан новый метод расчета интерференционной квантовой поправки к проводимости в широком интервале магнитного поля, описываются экспериментальные данные по отрицательному магнетосопротивлению в исследованных структурах и проводится сравнение данных с расчетом.

Несобственный интеграл  $P_n$  в формуле Дьяконова для вычисления интерференционной квантовой поправки в произвольном магнитном поле, представляется в виде конечной суммы функций параболического цилиндра с помощью разложения полинома Лагерра. Используя этот способ, было исследовано поведение интеграла  $P_n$  в зависимости от  $n$ , обнаружен простой аналитический вид асимптотики при  $n \rightarrow \infty$  с тремя членами разложения по

степеням  $1/\sqrt{n}$ :  $P_n \rightarrow 1/\sqrt{2xn}(\exp\{\frac{a(q)}{n}(1+\frac{b(q)}{n})\})$ , где  $q = (1+\beta)\sqrt{2/x}$ . Это

позволяет при расчете квантовой поправки  $\Delta\sigma(x)$  в заданном безразмерном магнитном поле  $x$  существенно сузить актуальную область численного интегрирования для нахождения  $P_n$ . С помощью рассчитанных зависимостей  $\Delta\sigma(x)$  проанализированы экспериментальные данные по отрицательному магнетосопротивлению в исследованных структурах. Монотонная квадратичная составляющая магнетосопротивления,

не связанная с разрушением слабой локализации, вычиталась. На Рис. 3 приведено изменение проводимости образца 5 второго типа в зависимости от магнитного поля  $x$ , а также линиями показаны расчетные зависимости  $\Delta\sigma(x)$  для различных значений параметра неупругой релаксации фазы  $\beta_\phi$ , пунктиром показана линия, дающая наилучшее

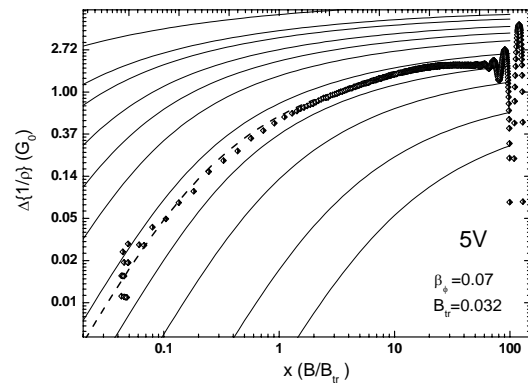


Рис. 3. Изменение проводимости в магнитном поле для образца 5 второго типа (квадраты) Сплошные линии - данные расчета

соответствие с экспериментом. Хорошее согласие экспериментальных данных с расчетом наблюдается вплоть до сильных магнитных полей ( $x \sim 10 \div 100$ ), то есть за диффузионным пределом. При наличии слабой спиновой релаксации ( $\beta_S < \beta_\phi$ ) дополнительный максимум положительного магнетосопротивления не проявляется, поэтому из аппроксимации экспериментальных зависимостей извлекается не  $\beta_\phi$ , а эффективный параметр  $\beta^* = \beta_\phi + 2\beta_S$ . Данная формула сложения следует из разложения функции  $F(x, \beta)$ , область ее применимости была установлена с помощью расчетов. Для  $\beta_\phi < 0.1$  и  $\beta_S < \beta_\phi$  эта формула дает отклонение не более 10% в  $\Delta\sigma(x)$ , для меньших  $\beta_\phi$  согласие улучшается.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) В работе изучено влияние тонкого барьера в центре квантовой ямы на латеральный транспорт электронов. Исследовались образцы двух типов: с гетероструктурными квантовыми ямами  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  и  $GaAs/In_yGa_{1-y}As/GaAs$ . Измерялись температурные зависимости сопротивления,

холловской подвижности и концентрации, магнетосопротивление как в слабых, так и в квантовых магнитных полях до 40 Тл, квантовый эффект Холла и эффект Шубникова- де Гааза в интервале температур  $0.3 \text{ K} < T < 4.2 \text{ K}$ . Кроме этого, исследовались спектры фотолюминесценции, фотоотражения и проводились структурные исследования методами масс-спектропии вторичных ионов, рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии для определения толщины, состава и кристаллического совершенства слоев.

2) Обнаружен эффект увеличения подвижности электронов при введении барьера AlAs в центр узкой КЯ  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ , и уменьшения подвижности при введении такого барьера в широкую КЯ. Изменение подвижности при введении барьера сохраняется в широком интервале температур и характерно для рассеяния электронов как на акустических, так и на оптических фононах. Эффект изменения подвижности обусловлен изменением пространственного профиля электронных волновых функций и эффективной ширины КЯ при введении барьера, что приводит к изменению форм-фактора рассеяния на оптических и акустических фононах.

В образцах с неглубокой квантовой ямой  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{GaAs}$  введение барьера AlAs приводит к уменьшению подвижности электронов и изменению характера температурных зависимостей сопротивления и подвижности, так как барьер существенно изменяет пространственную конфигурацию волновых функций, приводя к образованию гибридных состояний, для которых волновые функции распределены как в КЯ, так и в дельта-легированных слоях. Изменение конфигурации волновых функций приводит к изменению доминирующего механизма рассеяния: в одиночной КЯ доминирует рассеяние на акустических и оптических фононах, а в КЯ с барьером AlAs - рассеяние на ионизированной примеси.

3) Дополнительная потенциальная яма, образованная вставкой  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  толщиной 1 нм в центре КЯ  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{GaAs}$ , приводит к сильному уменьшению подвижности электронов. В этом случае волновая функция электронов локализуется в области вставки, и эффективная ширина квантовой ямы уменьшается. Эффект уменьшения подвижности обусловлен ростом рассеяния на шероховатостях границ и флуктуациях состава вставки  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ .

4) В сильнолегированных КЯ GaAs/In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As/GaAs при введении барьера AlAs концентрация электронов в подзоне КЯ уменьшается, а в подзонах дельта-слоев увеличивается. С помощью расчетов подвижности и анализа холловских величин показано, что подвижность электронов в верхней гибридной подзоне КЯ остается высокой, так как заполненные электронами подзоны в дельта-слоях эффективно экранируют рассеяние на ионизированных примесях. Эффект проявляется в значительном уменьшении частоты осцилляций в эффекте Шубникова – де Гааза от подзоны КЯ с высокой подвижностью электронов.

5) Исследовано влияние квантовых поправок к проводимости на температурные зависимости сопротивления. Показано, что в образцах с невысокой проводимостью температурная зависимость сопротивления в широком интервале температур определяется температурной зависимостью интерференционной квантовой поправки. При уменьшении температуры величина поправки сравнивается с друдевской проводимостью, и сопротивление образца логарифмически возрастает.

6) Исследование спектров низкотемпературной фотолюминесценции для КЯ GaAs/In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As/GaAs показало, что введение барьера приводит к увеличению энергии основного перехода и исчезновению дополнительного перехода. Это обусловлено увеличением энергии нижней электронной подзоны КЯ и уменьшением энергии подзон дельта-слоев. Исследовано влияние уровня легирования на зонную структуру и на спектры фотоотражения для КЯ Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As. Сравнение с расчетами показывает, что изменение энергии и интенсивности оптических переходов связано с распрямлением профиля зон и увеличением вероятности переходов между нижними электронными и верхними дырочными состояниями.

7) Разработан эффективный метод расчёта интерференционной квантовой поправки к проводимости, применимый как в диффузионном приближении, так и за диффузионным пределом. Метод основан на использовании установленной с помощью расчетов аналитической формулы для асимптотики интеграла, входящего в сумму ряда для вычисления поправки. Сравнение экспериментальных данных по отрицательному магнетосопротивлению в исследованных образцах с результатами расчета показывает, что данные хорошо

описываются расчетными зависимостями в широком интервале магнитных полей. Показано, что при наличии слабой спиновой релаксации из анализа экспериментальных данных определяется эффективное значение параметра неупругой релаксации фазы, которое связано с его истинным значением и параметром спиновой релаксации.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. И. С. Васильевский, А. В. Деркач; «Электронный транспорт в квантовых ямах AlGaAs/GaAs/AlGaAs с барьером AlAs в середине», Всероссийская Научная Конференция Студентов-Физиков 8, сб. тезисов, стр. 170-171 (2002)
2. И. С. Васильевский, А. В. Деркач; «Подвижности электронов в квантовых ямах AlGaAs/GaAs/AlGaAs с центральным барьером AlAs», Международная Конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «ЛОМОНОСОВ-2002», сб. тезисов, стр. 203-204 (2002)
3. Г. Б. Галиев, В. Э. Каминский, В. Г. Мокеров, В. А. Кульбачинский, В. Г. Кытин, Р. А. Лунин, И. С. Васильевский, А. В. Деркач; «Исследование электронного транспорта в связанных квантовых ямах с двухсторонним легированием», *ФТП*, том **37**, вып 6, стр. 711-716 (2003)
4. V.A. Kulbachinskii, R.A. Lunin, I.S. Vasil'evskii; «Peculiarities of electron transport in the coupled AlGaAs/GaAs quantum wells with central AlAs barrier», *Int. J. of Nanoscience*, **2** (6), p. 565-573 (2003)
5. V.A. Kulbachinskii, R.A. Lunin, I.S. Vasil'evskii, G.B. Galiev, V.G. Mokerov, V.E. Kaminskii; «Peculiarities of electron transport in the coupled AlGaAs/GaAs quantum wells with central AlAs barrier», proceedings of 11<sup>th</sup> Int. Symposium on Nanostructures Nano-2003, p. 402-403 (2003)
6. L.P. Avakyants, P.Yu. Bokov, A.V. Chervyakov, G.B. Galiev, E.A. Klimov, I.S. Vasil'evskii; «Room temperature photorefectance investigation of undoped and doped GaAs/AlGaAs quantum well structures», Proc. SPIE, vol. **5401**, p. 605-607 (2003)
7. Р. А. Лунин, В. А. Кульбачинский, И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, В. Э. Каминский, П.В. Гурин; «Подвижность электронов в связанных квантовых ямах AlGaAs/GaAs, разделённых барьером AlAs», XXXIII совещание по физике низких температур, НТ-33, сб. трудов, стр. 298-299 (2003)



8. Г. Б. Галиев, В. Э. Каминский, В. А. Кульбачинский, Р. А. Лунин, И. С. Васильевский; «Отрицательное магнетосопротивление в селективно легированных гетероструктурах AlGaAs/GaAs/AlGaAs/GaAs», VI Российская конференция по физике полупроводников, сб. тезисов, стр. 301-302, (2003)
9. Г. Б. Галиев, В. Э. Каминский, И. С. Васильевский, Р. А. Лунин; «Электронный магнетотранспорт в связанных квантовых ямах с двусторонним легированием», *ФТП*, том **38**, вып. 11, стр. 1368-1373 (2004)
10. L. P. Avakyants, P. Yu. Bokov, A. V. Chervyakov, G. B. Galiev, E. A. Klimov, I. S. Vasil'evskii; «Photoreflectance investigation of GaAs/AlGaAs quantum well structures with various level of doping», International Workshop on Modulation Spectroscopy of Semiconductor Structures, proceedings, p. 39-40 (2004)
11. И. С. Васильевский; «Отрицательное магнетосопротивление в структурах AlGaAs/GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами», Международная Конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «ЛОМОНОСОВ-2004», сб. тезисов, стр. 318-320 (2004)
12. G. B. Galiev, V. E. Kaminskii, V. G. Mokerov, I. S. Vasil'evskii, V. A. Kulbachinskii, R. A. Lunin; «Magnetotransport in doped heterostructures with coupled quantum wells», International Symposium on Nanostructures Nano-2004, proceedings, p. 348-349 (2004)
13. И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, Г. В. Ганин, Р. М. Имамов, Е. А. Климов, А. А. Ломов, В. Г. Мокеров, В. В. Сарайкин, М. А. Чуев; «Влияние легирования барьерных слоёв AlGaAs на структурные и электрофизические свойства системы n-AlGaAs/GaAs/n-AlGaAs с тонким разделяющим AlAs слоем внутри GaAs», *Микроэлектроника*, том **34**, №1, стр. 52-62 (2005)
14. Г. Б. Галиев, И. С. Васильевский, Е. А. Климов, В. Г. Мокеров; «Электрофизические свойства модулированно- и дельта- легированных Р-НЕМТ транзисторных структур на основе  $Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As/GaAs$ », *Микроэлектроника*, том **34**, №6, стр. 403-409 (2005)
15. И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, В. Г. Мокеров, Р. А. Лунин, В. А. Кульбачинский; «Транспортные и оптические свойства мелких псевдоморфных квантовых ям GaAs/InGaAs/GaAs с двусторонним дельта-легированием: влияние тонкого центрального барьера AlAs», VII Российская конференция по физике полупроводников, сб. тезисов, стр. 244 (2005)

16. V. E. Kaminskii, G. B. Galiev, V. G. Mokerov, I. S. Vasil'evskii, R. A. Lunin, V. A. Kul'bachinskii; «Magnetoresistance Of Coupled Quantum Wells In Quantizing Magnetic Field», International Conference on Micro- and Nanoelectronics, ICMNE-2005, сб. тезисов, р. O2-09 (2005).
17. I. S. Vasil'evskii, V. A. Kulbachinskii, G. B. Galiev, R. M. Imamov, A. A. Lomov, D. Yu Prohorov ; «Structural and electrophysical properties of pseudomorphic GaAs/InGaAs/GaAs quantum wells: effect of thin central AlAs barrier», International Conference on Micro- and Nanoelectronics ICMNE-2005, сб. тезисов, р. 2-23 (2005).
18. Д. Ю. Прохоров, А. Г. Сутырин, А. А. Ломов, Р. Касеровский, И. С. Васильевский, В. А. Кульбачинский, Г. Б. Галиев. «Возможности рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии в характеристике низкоразмерных внутренних слоев гетеросистем на основе  $A^3B^5$ », 5-я Национальная Конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследований наноматериалов и наносистем, РСНЭ-НАНО 2005, сб. тезисов, стр. 250 (2005)
19. И. С. Васильевский; «Гибридные состояния и электронный транспорт в двусторонних дельта-легированных квантовых ямах GaAs/InGaAs/GaAs», 7-я молодежная конференция по физике полупроводников и оптоэлектронике, Санкт-Петербург, сб. тезисов, стр. 48 (2005)
20. И. С. Васильевский; «Вычисление интерференционной квантовой поправки к проводимости в произвольном магнитном поле», 7-я молодежная конференция по физике полупроводников и оптоэлектронике, Санкт-Петербург, сб. тезисов, стр. 47 (2005)
21. L. P. Avakyants, P. Yu. Bokov, A. V. Chervyakov, G. B. Galiev, E. A. Klimov, I. S. Vasil'evskii, V. A. Kulbachinskii; «Interband optical transitions in the GaAs modulation doped quantum wells: photorefectance experiment and self-consistent calculations»; *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, р. 462-466 (2006)