

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина

---

*На правах рукописи*

**ДИЖУР Евгений Михайлович**

**ЭФФЕКТЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ И  
МЕЖЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ПЕРЕХОДЕ ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЫ К  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ**

Специальность:

01.04.07 — физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Троицк – 2007 г.

Работа выполнена в Институте физики высоких давлений РАН им. Л.Ф. Верещагина.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, В.А. Волков

доктор физико-математических наук,  
профессор Е.П. Скипетров

член-корр. РАН,  
профессор Е.Г. Максимов

Ведущая организация — Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова

Защита состоится "29" октября 2007 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д.002.097.01 при Институте физики высоких давлений РАН им. Л.Ф. Верещагина, 142190, г. Троицк.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



к.ф.-м.н.

М.В. Магницкая

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Полупроводниковые структуры с низкой размерностью свободного движения носителей заряда (то есть структуры в которых движение носителей заряда квантованно хотя бы в одном из пространственных направлений) интересны, как с технологической (высокоэффективные полупроводниковые лазеры) так и с фундаментальной точки зрения (проявление квантовых эффектов на макроскопическом уровне – квантовый эффект Холла). Квантовая точка – это предельный случай системы с нулевой размерностью (движения носителей квантовано во всех трех направлениях), а квантовая яма – это наиболее характерный из объектов, к которым применимо понятие системы низкой размерности (в данном случае, двумерной).

Условия для экспериментального исследования двумерных электронных систем, в настоящее время, реализуются разными путями. В одном случае объектами являются полупроводниковые системы с барьером Шоттки или одиночным гетеропереходом. Электроны на формируемом в области обогащенного заряда квантовом уровне обладают свойствами двумерной электронной системы (ДЭС), а их концентрацию можно изменять, варьируя потенциал затвора. В другом случае ДЭС сосредоточена в области квантовой ямы, образованной тонким слоем одного полупроводника, помещенного между двумя (относительно толстыми) слоями другого полупроводника.

Развитие технологии изготовления двумерных структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволило получать слоистые структуры точно заданных состава и толщины слоев вплоть до атомной, и, таким образом, изучать свойства двумерной электронной системы, локализованной в одиночной квантовой яме. Такие ямы могут быть созданы в одиночном и двойном гетеропереходах, в структурах типа металл-

диэлектрик-полупроводник или в структурах с барьером Шоттки с приповерхностным слоем дельта-легирования.

Помимо очевидной связи этого направления с вопросами технологии и применения полупроводников для построения элементной базы современной и перспективной электроники, в нем можно выделить отдельную область, представляющую интерес с фундаментальной точки зрения – взаимодействия электронов между собой и с другими квазичастицами. Межэлектронное и электрон-фононное взаимодействие оказывает значительное влияние на свойства электронной плазмы в твердых телах. Их роль становится определяющей в таких явлениях как дробный квантовый эффект Холла, вигнеровская кристаллизация, переход металл-диэлектрик, поляроны в полупроводниках и т.п., поэтому экспериментальное и теоретическое изучение такого рода объектов и явлений составляет фундаментальную задачу физики конденсированного состояния и отнесено к приоритетным направлениям физических исследований.

По сравнению с трехмерными системами, в системах низкой размерности в гораздо большей степени проявляется нарушение периодичности кристаллической структуры. Легко показать, что с понижением размерности зависимость отношения потенциальной энергии кулоновского взаимодействия к кинетической от концентрации становится более резкой. Кроме того, уменьшение числа степеней свободы сказывается на ослаблении экранировки кулоновского взаимодействия свободными электронами, что еще более повышает степень неидеальности электронного газа.

В этом контексте, особый интерес представляет поведение системы при переходе от проводящего к диэлектрическому состоянию. В настоящее время принято разделять переходы металл-диэлектрик на два типа – те из них, которые являются следствием структурных фазовых переходов, приводящих к

кардинальному изменению зоны проводимости, и те, которые определяются взаимодействием. В последнем случае различают два альтернативных механизма – корреляцию и локализацию в электронной системе, рассматриваемые, соответственно, в рамках моделей Мотта-Хаббарда и Андерсона. В реальности оба эти механизма сосуществуют, и степень их проявления зависит от соотношения взаимодействия и беспорядка в системе. В то время как корреляционные (и обменные) эффекты зависят, главным образом, от электронной плотности, локализация определяется степенью беспорядка. Имеется также точка зрения, согласно которой<sup>1</sup> одновременное присутствие эффектов корреляции и беспорядка приводит к появлению квантовой критической точки, разделяющей металлическую фазу, стабилизированную электронным взаимодействием, и диэлектрическую фазу, в которой беспорядок превалирует над взаимодействием, что приводит к расходимости плотности состояний при переходе металл-диэлектрик и определяет появление аномалии транспортных свойств и возрастание спиновой восприимчивости.

Таким образом, исследование электронного транспорта вблизи перехода металл-диэлектрик и его связи с параметрами двумерной системы при изменении концентрации носителей является одним из естественных этапов решения указанной выше фундаментальной задачи.

Принято считать, что понятие перехода металл-диэлектрик применимо лишь к трехмерной системе. Тем не менее, учитывая сложившуюся в литературе традицию, мы будем пользоваться этим словосочетанием и для двумерных систем, имея в виду, по крайней мере, резкое изменение как величины проводимости, так и характер ее зависимости от концентрации носителей, температуры и других параметров, характеризующих систему при конечной температуре.

---

<sup>1</sup>A.Punnoose, A.Finkelstein, Science, Vol. 310. no. 5746, pp. 289 - 291 (2005)

**Целью работы является** получение информации о механизмах, определяющих транспортные свойства носителей в двумерной электронной системе вблизи перехода металл-диэлектрик, на основе экспериментальных исследований изменения режима проводимости при изменении концентрации двумерных носителей в квантовых ямах. К этим исследованиям мы относим магнитотранспортные измерения ДЭГ в инверсионном слое кремниевых структур металл-окисел-полупроводник, магнитотранспортные измерения ДЭГ в структурах с одиночной квантовой ямой GaSb/InAs/GaSb, измерения латерального и туннельного транспорта структур Al/ $\delta$ (Si)-GaAs с приповерхностным слоем дельта-легирования, а также методически связанные с ними исследования влияния давления и степени объемного легирования полупроводника на туннелирование в образцах с барьером Шоттки Me/n-GaAs.

**Объекты и методы исследования.**

К настоящему времени усилиями исследователей, в связи с проблемой поведения системы носителей вблизи перехода металл-диэлектрик, накоплен весьма обширный экспериментальный материал, который непрерывно пополняется. Однако, при этом существует определенная трудность при сопоставлении между собой результатов, полученных различными исследователями, из-за неизбежного разброса параметров исследуемых образцов. Кроме того, физическая интерпретация результатов иногда осложняется довольно косвенным (непрямым) характером измерений.

В представляемых исследованиях особенностей электронного транспорта вблизи перехода двумерной электронной системы в диэлектрическое состояние в качестве инструментального средства широко применяется техника высоких давлений. Использование высокого давления позволяет варьировать параметры решетки и, тем самым, изменять энергетический

спектр электронов<sup>2</sup>. В GaAs, например, давление позволяет изменять концентрацию носителей в широких пределах благодаря присутствию метастабильных донорных дефектов, образованных примесями замещения (Si, Te, Sn), так называемых DX-центров (их присутствие, в частности, ответственно за долгоживущую фотопроводимость). При достаточно высокой изначальной степени легирования (порядка  $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  в объеме) под давлением около 2 ГПа уровень DX-центров опускается ниже уровня Ферми, и часть электронов локализуется на нем, в результате чего эффективная концентрация носителей, участвующих в переносе заряда, уменьшается, что стимулирует переход в диэлектрическое состояние. Существенно, что при этом изменение концентрации электронов не требует изменения концентрации легирующих примесей и, связанного с этим, изменения условий рассеяния носителей, а постоянная решетки является единственным варьируемым параметром.

Помимо использования техники высоких давлений, в этом цикле работ получение количественной информации основывалось на проведении магнитотранспортных и туннельных измерений.

Анализ осцилляций Шубникова-де Гааза и компонент тензора магнитосопротивления позволил определить барическую зависимость концентрации носителей в процессе изменения режима проводимости полупроводниковых гетероструктур с одиночной квантовой ямой GaSb/InAs/GaSb.

Исследование области отрицательного магнитосопротивления, обусловленного явлением слабой локализации и результаты магнитотранспортных измерений в скрещенных магнитных полях позволили определить квантово-механические параметры, такие как характерные времена релаксации, эффективную

---

<sup>2</sup>Кроме того, давление может выступать в качестве термодинамического параметра, определяющего, наряду с температурой, возникновение структурных фазовых переходов, но здесь этот аспект применения высоких давлений не рассматривается.

массу и  $g$ -фактор носителей в двумерной электронной системе в инверсионном слое кремниевых структур металл-окисел-полупроводник.

Анализ туннелирования через барьер Шоттки в систему с ДЭГ, сформированным в приповерхностном слое  $\delta$ -легирования, позволил определить положение уровней размерного квантования. В отличие от магнитотранспортных измерений, в которых исследуются носители только на заполненных уровнях пространственного квантования, туннелирование позволяет исследовать спектры незаполненных подзон.

В туннельных спектрах проявляются также и многочастичные эффекты. Эффекты, связанные с межэлектронным взаимодействием, определяют особенность в виде пика туннельного сопротивления, так называемую аномалию при нулевом смещении (АНС), в которой содержится информация об обменно-корреляционном потенциале на поверхности Ферми. Взаимодействие электронов и фононов тоже проявляется в виде характерных особенностей в туннельных спектрах. В частности, для туннельных контактов на основе GaAs эти особенности наблюдаются при напряжениях на переходе  $\sim \pm 36.5\text{mV}$ , соответствующих энергии продольного оптического (LO) фонона в GaAs.

Использованные оригинальные методические разработки были связаны с необходимостью проведения исследований под давлением в условиях существенного увеличения измеряемого сопротивления объектов вблизи перехода в диэлектрическое состояние. В частности, при исследованиях туннельных структур на основе  $\text{Me}/\delta(\text{Si})\text{-GaAs}$  требовалось измерять туннельное сопротивление порядка 1 ГОм при сопротивлении подводящего участка  $\delta$ -слоя в несколько сотен МОм, что исключало возможность воспользоваться модуляционной методикой измерений, а сами измерения отличались большой длительностью. Это, в свою очередь, потребовало разработки и реализа-

ции специальных алгоритмов обработки экспериментальных результатов для извлечения из них физической информации. Основные методические задачи, которые пришлось решить в ходе выполнения работы, связаны с разработкой конструкции камеры высокого давления для низкотемпературных измерений, метода туннельных измерений под давлением на постоянном токе, метода определения концентрации носителей и параметров барьера из экспериментальных данных по туннелированию в системе с барьером Шоттки и с развитием методики анализа результатов магнитотранспортных исследований.

**Научно-методическая новизна** работы состоит в применении техники высоких давлений в экспериментальных исследованиях перехода металл-диэлектрик в двумерной электронной системе, а **научная новизна** результатов работы состоит в обнаружении новых эффектов, связанных с влиянием особенностей зонной структуры на туннельный транспорт, получении новой информации о зависимости параметров носителей от концентрации и уточнении роли механизмов, определяющих характер электронного транспорта в двумерной электронной системе вблизи перехода металл-диэлектрик.

В частности, следующие результаты, получены впервые:

1. Разработан метод измерений туннельных спектров на постоянном токе;
2. Разработан метод определения высоты барьера Шоттки и концентрации заряженных примесей непосредственно из туннельных вольтамперных характеристик;
3. Получена барическая зависимость высоты барьера Шоттки  $n\text{-GaAs(Te)/Au}$  до 3 ГПа для случая сильного легирования полупроводника;
4. Обнаружена бистабильность (или эффекты переключения) туннельных характеристик структур на основе ле-

гированного  $GaAs$  в области давлений порядка 2.0 – 2.2 ГПа, при которых происходит сближение минимумов  $\Gamma$ – $L$ - и  $X$ -долин в зоне проводимости;

5. Обнаружен переход ДЭС в структуре  $Al/\delta(Si)-GaAs$  в состояние диэлектрика под давлением;
6. Получена барическая зависимость положения зон размерного квантования в системе  $Al/\delta(Si)-GaAs$  и формы особенностей в туннельном спектре, обусловленных электрон-фононным и электрон-электронным взаимодействием, вплоть до перехода металл-диэлектрик;
7. Достигнут переход от полуметаллического к полупроводниковому режиму проводимости и, далее, к состоянию изолятора в системе с квантовой ямой  $GaSb/InAs/GaSb$  при увеличении давления;
8. Получена барическая зависимость концентраций электронов и дырок в системе с квантовой ямой  $GaSb/InAs/GaSb$  под давлением до 2.5 ГПа;
9. Получена барическая зависимость подвижности носителей и характерных времен релаксации импульса и сбоя фазы в системе с квантовой ямой  $GaSb/InAs/GaSb$ ;
10. Определены время сбоя фазы в кремниевых МОП-структурах с высокой концентрацией носителей и концентрационная зависимость спиновой восприимчивости, эффективной массы и  $g^*$ -фактора при низкой электронной плотности.

**На защиту выносятся** следующие положения:

1. Конструкция камеры высокого давления;

2. Безмодуляционная методика измерений туннельных спектров на постоянном токе;
3. Метод определения высоты барьера Шоттки и концентрации заряженных примесей непосредственно из туннельных вольтамперных характеристик;
4. Вывод о качественном изменении характера барьерной зависимости высоты барьера Шоттки  $n\text{-GaAs}(\text{Te})/\text{Au}$  до 3 GPa в случае сильного легирования;
5. Существование перехода под давлением от полуметаллического к полупроводниковому режиму проводимости и, далее, к состоянию изолятора в системе с квантовой ямой GaSb/InAs/GaSb;
6. Существование при высоких гидростатических давлениях перехода металл-диэлектрик в системе Al/ $\delta$ (Si)-GaAs;
7. Количественные данные о перенормировке спиновой восприимчивости, эффективной массы электронов в двумерном слое в Si-МДП структуре, в широком диапазоне концентраций ( $r_s = 1.5 - 8.5$ ), вплоть до перехода металл-диэлектрик для ряда исследованных образцов.

**Научная и практическая ценность работы** состоит в разработке и реализации методики туннельных измерений под давлением на постоянном токе; создании пакетов программ для определения концентрации носителей и параметров барьера из экспериментальных данных по туннелированию в системе с барьером Шоттки и для расчета квантовомеханических параметров носителей из результатов магнитотранспортных измерений, а также в получении ряда новых экспериментальных результатов, касающихся режима проводимости двумерных систем носителей в квантовых ямах вблизи перехода

в диэлектрическое состояние. Методические разработки, связанные с обработкой экспериментальных данных, могут широко использоваться при решении различных измерительных задач.

**Личный вклад автора** состоит в общей постановке вопроса о применении техники высоких давлений в экспериментальных исследованиях перехода металл-диэлектрик в двумерной электронной системе в сочетании с туннельными и магнито-транспортными измерениями; разработка методики и экспериментальной установки для туннельных измерений на постоянном токе, позволяющей решить некоторые измерительные проблемы, связанные с необходимостью проведения измерений на объектах с высоким импедансом; разработке программного обеспечения для автоматизации процесса измерений и анализа экспериментальных данных; участии в проведении измерений и в анализе экспериментальных результатов.

Аналитическая часть в каждой из 45 опубликованных работ, как и содержательная часть во всех работах, связанных с туннельными измерениями и с исследованиями под давлением, не менее, чем на 50% выполнены непосредственно автором.

**Апробация работы:**

Основные результаты докладывались и обсуждались на 22 Всероссийских и международных конференциях:

VII-й Международной конференции по физике полупроводников при высоких давлениях (Швебиш Гмюнд, Германия, 1996); 3-й Всероссийской конференции по физике полупроводников, (Москва, 1997); 24-й Международной конференции по физике полупроводников (Иерусалим, Израиль, 1998); VIII-й Международной конференции по физике полупроводников при высоких давлениях (Тессалоники, Греция, 1998); Международном симпозиуме по оптике поверхности и интерфейса (SIO-

99) (Сан-Максим, Франция, 1999); 11-й Международной конференции по горячим носителям в полупроводниках HCIS-11 (Киото, Япония-1999); 4-й Российской конференции Полупроводники -99 (Новосибирск, 1999); IX-й Международной конференции по физике полупроводников при высоких давлениях (Саппоро, Япония-2000); 5-й Российской конференции Полупроводники -2001 (Нижний Новгород, 2001); 14й Международной конференции по электронным свойствам двумерных систем EP2DS-14, (Прага, 2001); X-й Международной конференции по физике полупроводников при высоких давлениях, (Гилфорд, Великобритания, 2002); 11-ом Международном симпозиуме "Наноструктуры: Физика и Технология" (Ст.Петербург, 2003); 2-й Азиатской конференции по исследованиям при высоких давлениях ACHPR-2, (Нара, Япония, 2004); 13-ом Международном симпозиуме "Наноструктуры: Физика и Технология" (Ст.Петербург, 2005); Международной объединенной конференции по развитию исследований при высоких давлениях 20th AIRAPT - 43th EHPRG, (Карлсруэ, Германия, 2005); 16й Международной конференции по электронным свойствам двумерных систем EP2DS-16, (Альбукерке, США, 2005); 7-й Российской конференции Полупроводники-2005 (Звенигород, 2005); 12-й Международной конференции по физике полупроводников при высоких давлениях (Барселона, Испания, 2006); 28-й Международной конференции по физике полупроводников (ICPS-28), Вена, Австрия, 2006); 3-й Азиатской конференции по исследованиям при высоких давлениях ACHPR-3, (Линцзян, КНР, 2006),

а также неоднократно докладывались на семинарах в ИФВД РАН, ФИАН РАН, ИРЭ РАН, Курчатовском научном центре. Основное содержание работы изложено в 27 научных публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Вве-

дения, 6 глав, Заключение и списка литературы. Работа изложена на 212 страницах, содержит 65 рисунков и список литературы, включающий 220 наименований.

## Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, перечислены основные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе определено место и содержание наших экспериментальных исследований с учетом современного состояния исследований перехода металл–диэлектрик [1],[2],[3].

В параграфе 1.1 описан ряд основных понятий, связанных с переходом металл-изолятор. Учет рассеяния в процессах переноса заряда, а также взаимодействия между частицами приводит к тому, что знак температурного коэффициента сопротивления перестает быть достаточным критерием, и фундаментальное отличие металла от изолятора следует связывать с тем, что электронные состояния на уровне Ферми в металле делокализованы и способны обеспечить перенос заряда, а в изоляторе – локализованы и заряд не переносят. Поскольку радиус локализации является количественным показателем и может зависеть от внешнего параметра, появляется возможность говорить о более или менее непрерывном переходе металл–диэлектрик при изменении этого параметра при конечной температуре измерений. Кратко описаны два основных механизма, приводящих к локализации электронов – корреляция вследствие взаимодействия и наличие беспорядка в системе. Отмечена роль феноменологической гипотезы скейлинга [4] и связанные с концепцией скейлинга вопросы фундаментального характера, которые еще не закрыты вплоть до настоящего времени.

В параграфе 1.2 изложены существующие представления о связи размерности системы с переходом металл-изолятор. Отмечено, что с понижением размерности зависимость отношения потенциальной энергии к кинетической, определяющей

степень неидеальности электронной системы,  $r_s$  от концентрации становится более резкой, а, кроме того, уменьшение числа степеней свободы сказывается на ослаблении экранировки кулоновского взаимодействия.

Параграф 1.3 посвящен изложению представлений о роли взаимодействия при переходе металл-изолятор, который в двумерных системах не укладывается в теорию однопараметрического скейлинга для невзаимодействующих 2D электронов[5]. Если же отнести этот переход за счет взаимодействия, то его происхождение может быть связано либо с переключением от квантового транспорта к классическому, либо с преобладанием квантовых эффектов электрон-электронного взаимодействия. Обсуждаются некоторые экспериментальные возможности определения перенормировки эффективного  $g^*$ -фактора и эффективной массы  $m^*$  в зависимости от значения  $r_s$  из результатов измерений эффекта Шубникова-де Гааза при независимом изменении компонент магнитного поля, что позволяет разделить вклады от орбитальной и спиновой степеней свободы.

В параграфе 1.4 приведена краткая сводка экспериментальных исследований структур с 2D электронами, в качестве которых наиболее широко применяются системы металл-окисел-полупроводник, гетероструктуры и некоторые другие системы с квантовыми ямами. Отмечено, что, в качестве критического параметра, определяющего переход металл-диэлектрик, наряду с концентрацией носителей использовались и другие параметры, в том числе и давление[6].

**Вторая глава** посвящена описанию методик проведения туннельных и магнитотранспортных измерений под гидростатическим давлением до 3 ГПа и обработки полученных экспериментальных данных, использованных для изучения поведения энергетического спектра, транспортных свойств и взаимо-

действия в системе двумерных электронов в условиях перехода в диэлектрическое состояние и в режиме слабой локализации П[1–7, 12–14, 21]<sup>3</sup>. Здесь же представлена сводная таблица сочетания исследованных объектов с использованными экспериментальными методиками и изложены основания для использования в исследованиях техники высоких давлений.

В параграфе 2.1 описана камера высокого давления, использовавшаяся в исследованиях под гидростатическим давлением до 3 ГПа при гелиевых температурах, представлены ее рабочие характеристики и процедура генерации давления.

В параграфе 2.2 данной главы описана методика магнитотранспортных измерений. **Измерения в слабых полях** использовались для анализа интерференционной поправки к обычной проводимости Друде  $ne^2\tau/m$  из-за существования самопересекающихся траекторий при диффузионном движении электронов. При полуклассическом описании, это означает, что электроны могут обходить замкнутые петли в двух противоположных направлениях, и такое движение не дает вклада в проводимость. В результате, относительное уменьшение проводимости оказывается пропорциональным вероятности самопересечения. На квантовом языке, это соответствует конструктивной интерференции электронных волн в точках самопересечения. Внешнее магнитное поле, нормальное к плоскости траекторий, приводит к тому, что волны приобретают противоположные фазовые сдвиги, пропорциональные потоку через замкнутые петли. Нарушение когерентности в магнитном поле восстанавливает проводимость. Это явление, обычно, называют слабой локализацией, и выражение для зависящего от магнитного поля вклада в проводимость [7] дается формулой Хиками-

---

<sup>3</sup>П[] отсылает к списку “Публикации по теме диссертации”

Ларкина, применимой для области слабых магнитных полей

$$\Delta\sigma_{xx} = -\frac{\alpha g_v e^2}{2\pi^2 \hbar} \left[ \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{\hbar}{4eBD\tau}\right) - \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{\hbar}{4eBD\tau_\varphi}\right) \right] \quad (1)$$

где  $g_v$  - долиное вырождение,  $D$  - коэффициент диффузии,  $B$  - нормальное поле,  $\tau$  и  $\tau_\varphi$  - времена релаксации импульса и фазы (называемые также транспортным временем релаксации и временем сбоя фазы),  $\alpha$  - константа для учета междолинного рассеяния и кулоновского взаимодействия, значение которой, по теории, заключено между 0.5 и 1,  $\Psi$  - так называемая пси- или дигамма-функция, равная логарифмической производной  $\Gamma$ -функции. Это выражение использовалось для нахождения времен релаксации импульса и фазы из данных по отрицательному магнитосопротивлению при изучении квантовых ям GaSb/InAs/GaSb и ДЭГ в инверсионном слое Si-МОП структуры.

Измерения **в квантующих полях** использовались для регистрации осцилляций Шубникова - де Гааза (ШдГ) с последующим анализом на основе выражения Исихары-Смрчки[8] для невзаимодействующих электронов:

$$\frac{\delta\rho_{xx}}{\rho_0} = \sum_s A_s \cos \left[ \pi s \left( \frac{2\pi\hbar N}{g_v e B_\perp} - 1 \right) \right] Z_s, \quad (2)$$

где

$$A_s = 2g_v \exp\left(-2\pi^2 s \frac{k_B T_D}{\hbar\omega_c}\right) \frac{2\pi^2 s k_B T / \hbar\omega_c}{\sinh(2\pi^2 s k_B T / \hbar\omega_c)}. \quad (3)$$

Здесь  $\rho_0 = \rho_{xx}(B_\perp = 0)$ ,  $\omega_c = eB_\perp/m^*m_e$  - циклотронная частота,  $m^*$  - безразмерная эффективная масса,  $m_e$  - масса свободного электрона и  $T_D$  - температура Дингла,  $n$  - концентрация 2D-электронов. В выражениях (2, 3) долиное вырождение  $g_v=1$  в случае n-InAs и  $g_v=2$  в случае n-Si. Зеemannовский множитель  $Z_s = \cos\left(\frac{\pi^2 s \hbar (n_\uparrow - n_\downarrow)}{eB_\perp}\right)$  сводится к константе при  $B_\parallel = 0$ .

Отличное от нуля  $B_{\parallel}$  приводит к появлению биений в шубниковских осцилляциях в функции от  $B_{\perp}$  с частотой, пропорциональной спиновой поляризации:

$$P = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n} = \frac{\chi^* B_{tot}}{g_b \mu_B n} = g^* m^* \frac{B_{tot}}{\nu B_{\perp}},$$

где  $n_{\uparrow(\downarrow)}$  соответствует концентрации электронов со спином вверх(вниз),  $\chi^* \propto g^* m^*$  - спиновая восприимчивость Паули,  $g_b \approx 2$  - “голый”  $g$ -factor for Si,  $B_{tot} = \sqrt{B_{\parallel}^2 + B_{\perp}^2}$  и  $\nu = nh/eB_{\perp}$  - фактор заполнения уровней Ландау.

При анализе шубниковских осцилляций ДЭГ в кремниевых МОП структурах, измеренных в скрещенных магнитных полях с независимым управлением величиной нормальной и тангенциальной компонент поля, с помощью сглаживающего сплайна проводились верхняя и нижняя кривые, касательные соответственно к максимумам и минимумам осцилляций. Их полусумма принималась в качестве “фона”, а полуразность соответствовала осциллирующей компоненте, наложенной на фон. После деления осциллирующей компоненты на огибающую, амплитуда осцилляций становилась постоянной, что позволило с высокой точностью найти положения узлов биений и определить значение  $m^* g^*$  из измерений шубниковских осцилляций при различных концентрациях электронов для различных полей и температур. При прохождении через узлы фаза шубниковских осцилляций изменяется на  $\pi$  из-за множителя  $Z_s$  в выражении для осцилляций ШдГ.

В параграфе 2.3 описана методика туннельной спектроскопии, использовавшейся, наряду с измерением проводимости  $\delta$ -слоя, для экспериментального исследования перехода металл-диэлектрик, происходящего в двумерном электронном газе (ДЭГ), сформированном в структуре на основе Al/GaAs( $\delta$ -Si) со слоем приповерхностного  $\delta$ -легирования при уменьшении концентрации носителей.

В отличие от магнитотранспортных измерений, которые позволяют получать экспериментальную информацию только о заполненных (или частично заполненных) подзонах размерного квантования, туннелирование между металлическим затвором и ДЭГ, сосредоточенным в плоскости  $\delta$ -слоя позволяет определять положение и пустых подзон. Кроме того, на вольтамперных характеристиках (ВАХ) отражается взаимодействие электронов с продольными оптическими (LO) фононами и межэлектронное взаимодействие в плазме полупроводника, ответственное за появление так называемой аномалии при нулевом смещении (АНС).

Уменьшение концентрации электронов и увеличение высоты барьера приводят к уменьшению вероятности туннелирования, что проявляется как резкий рост туннельного сопротивления с давлением по мере приближения ДЭГ к переходу в диэлектрическое состояние, поэтому нам пришлось измерять туннельные характеристики полностью на постоянном токе в пико-амперном диапазоне и компенсировать как сужение динамического диапазона так и степень влияния импульсных помех с помощью соответствующей математической обработки данных, накопленных в цифровой форме.

В этом же разделе описаны схема, используемая как для питания образца заданным напряжением смещения, так и для измерения тока и процедура обработки туннельных данных, основанная на двухступенчатом сглаживании ВАХ  $I(V)$ , представленной в табличной форме, аппроксимирующим кубическим сплайном, позволяющая отделить фоновую составляющую, содержащую информацию о положении зон размерного квантования, от тонкой структуры, отражающей многочастичные взаимодействия. Приведены соответствующие фрагменты программ.

В третьей главе рассматриваются особенности туннели-

рования в системе с барьером Шоттки под давлением, представлены результаты экспериментальных исследований туннелирования через барьер Шоттки  $Au/n-GaAs : Te$  со степенью легирования свыше  $N_e \sim 5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$  под давлением до 3 ГПа [2–4, 10–12].

Хотя этот вопрос и не связан непосредственно с переходом металл-диэлектрик в ДЭС, он имеет важное значение при изучении под давлением неоднородных полупроводниковых структур, в которых происходит искривление зон на границе раздела, в том числе и для структур, в которых формируется ДЭС.

Количественных данных о высоте барьера в случае сильно легированного GaAs, в особенности, под давлением выше  $\approx 1.5$  ГПа, ранее не существовало. В связи с этим, возникла необходимость модифицировать разработанную ранее теорию, основанную на использовании выражения для туннельного тока, в которое входило квазиклассическое выражение для прозрачности барьера и точный первый интеграл уравнения Пуассона для кулоновского потенциала в полупроводнике, для того, чтобы учесть возможность уменьшения концентрации свободных электронов в  $\Gamma$ -долине, участвующих в туннелировании, в условиях высоких давлений и высокой степени легирования подложки  $n-GaAs$ . Кроме того, с учетом верхнего предела давлений в наших исследованиях, следовало считаться с возможностью перехода части электронов из  $\Gamma$ -долины в дополнительные, вышележащие минимумы  $L$ - и/или  $X$ -долин зоны проводимости.

Для того, чтобы, с одной стороны, учесть возможность отличия концентрации свободных электронов  $\Gamma$ -долины в объеме полупроводника от концентрации заряженных примесей в обедненном слое, а, с другой стороны, избежать необходимости делать необоснованные детальные предположения для модели  $DH(Te)$ -центров, построение теоретической модели туннельного транспорта произведено в следующих предположениях:

- Только свободные электроны  $\Gamma$ -долины, как имеющие наименьшую эффективную массу и для которых туннельный барьер наиболее прозрачен, определяют величину туннельного тока
- В той области барьера Шоттки, где напряженность электрического поля велика, все электроны, которые могли бы быть захвачены ловушками любого типа, освобождаются благодаря туннельной ионизации, причем граница между частично и полностью ионизованными центрами в обедненной области является резкой и может быть аппроксимирована ступенчатой функцией распределения напряженных примесей.
- В соответствии с условием нейтральности в объеме полупроводника, концентрация электронов  $N_e$  должна быть равна плотности положительного заряда  $N_+$ .

Процедура обработки данных основана на выражении для туннельного тока в виде:

$$I(V, T) =$$

$$\frac{em_c}{\pi\hbar^3} \int_0^\infty dE [f(E, T) - f(E + eV, T)] \int_0^\varepsilon dE_{\parallel} D(E, E_{\parallel}, V), \quad (4)$$

где  $f(E, T)$  фермиевская функция распределения при температуре  $T$ ,  $E$  - энергия электронов,  $E_{\parallel} = (\hbar\mathbf{k}_{\parallel})^2/2m_c$ ,  $\mathbf{k}_{\parallel}$  - компонента волнового вектора электрона вдоль плоскости контакта,  $m_c$  - эффективная масса электрона на дне  $\Gamma$ -долины зоны проводимости,  $V$  - напряжение смещения на переходе. В двухзонном приближении Франца квазиклассическое выражение для прозрачности  $D$  барьера можно записать в виде  $D(\varepsilon, \varepsilon_{\parallel}, V) =$

$$\exp\left(-\frac{2\sqrt{2m_c\mu_F^0}L_s}{\hbar} \int_{\varepsilon}^{\varphi_b} \frac{d\psi}{d\psi/dx} \sqrt{(\psi - \varepsilon)[1 - (\psi - \varepsilon)/\varepsilon_{\Gamma}] + \varepsilon_{\parallel}}\right),$$

где все переменные в подынтегральном выражении, записанные строчными символами, записаны в безразмерной форме, т.е. полная энергия  $\varepsilon$  и потенциал в барьере  $\psi$  нормализованы на характерную энергию  $\mu_F^0 = \hbar^2 k_F^2 / 2m_c$ , а пространственная координата  $x$  нормализована на характерную длину  $L_s = \sqrt{\kappa \mu_F^0 / 8\pi e^2 N_e}$ . Другие величины соответствуют  $k_F = (3\pi^2 N_e)^{1/3}$ ,  $\mu$  - энергия Ферми электронов в плазме полупроводника,  $\varphi_b = \varphi_s + \mu - eV / \mu_F^0$  - высота барьера на интерфейсе металл-полупроводник,  $\varepsilon_\Gamma$  - ширина прямой запрещенной зоны и  $\kappa$  - статическая диэлектрическая постоянная полупроводника.

Следует отметить важность интегрирования именно по  $\varepsilon_{\parallel}$  в выражении для туннельного тока, т.к. при столь высокой концентрации электронов барьер Шоттки становится очень тонким. Для корректного описания формы барьерного потенциала и, следовательно, туннельной характеристики  $I$ - $V$  в области напряжений смещения порядка энергии Ферми  $\mu \approx 150 \div 200$  мэВ для наших образцов, необходимо было включить в рассмотрение обменное взаимодействие в сильно вырожденном электронном газе.

При анализе экспериментальных данных в рамках предложенного теоретического описания, в качестве подгоночных параметров, помимо  $N_0$  и потенциала  $\Phi_s$  на поверхности, использовались также максимальная плотность ионизованных примесных атомов в обедненном слое и критическая напряженность поля  $E_{cr}$ , ниже которой плотность заряженных ионов равна плотности свободных электронов. Другими словами, энергия Ферми  $\mu$  электронов  $\Gamma$ -долины и отношение концентраций  $N_+ / N_0$  ионизованных примесных атомов в области сильного поля в барьере, также рассматриваются в процедуре подгонки в качестве свободных (т.е. подлежащих определению) параметров. В этом и состоит основное отличие настоящего подхода. Для отладки модели и предлагаемого подхода, по-

следний был использован при анализе экспериментальных результатов по фотоотклику туннельных диодов с барьером Шоттки Al/n-GaAs при воздействии лазерного излучения.

Четырехпараметрическая подгонка методом наименьших квадратов с учетом известных барических зависимостей ширины запрещенной зоны  $E_{\Gamma} = 1.514 + 10.8 \cdot 10^{-2} P$ ; ( $P$  в GPa,  $E_{\Gamma}$  в eV), диэлектрической постоянной  $d\kappa/dP = -0.0881/GPa$  и эффективной массы на дне  $\Gamma$ -долины в виде  $m_c(P) = m_c(0)(1 + \Delta E_{\Gamma}(P)/E_{\Gamma})$  дает очень хорошее согласие с экспериментальными ВАХ  $I(V)$ . При этом обнаруживается хорошее согласие даже между измеренным дифференциальным сопротивлением и результатом численного дифференцирования подогнанной ВАХ, за исключением непосредственной области нулевого смещения при самых больших давлениях, где наблюдается существенное усиление туннельной аномалии при нулевом смещении (АНС).

Было найдено, что при  $P = 0$  отношение  $N_+/N_e$  отлично от единицы для всех образцов с  $N_e > 5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . Как и предполагалось, характерное значение напряженности электрического поля, при котором происходит туннельная ионизация примесей, оказалось существенно больше, чем  $10^5 \text{ V/cm}$ . Это свидетельствует о том, что в сильно легированном  $GaAs(Te)$  плотность положительного заряда примесей в области барьера заметно выше, чем концентрация свободных электронов в объеме полупроводника. Следовательно, даже при нулевом давлении в сильно легированном  $GaAs$  далеко не все примеси поставляют свободные электроны. Аналогичные результаты получены при  $P > 0$  для всех образцов.

Изменение высоты барьера Шоттки  $\Delta\Phi_s(P)$ , вычисленное с помощью описанной выше процедуры и измеренная барическая зависимость дифференциального туннельного сопротивления при нулевом напряжении смещения указывают на гораздо более медленный рост с давлением, чем тот, который

следует из равенства  $\Delta\Phi_s(P) = \Delta E_T(P)$ , определенный из измерений  $C-V$  на слабо легированных образцах. Более того, при давлениях  $P > 2.1\text{GPa}$  обе зависимости имеют отрицательный наклон. Это наряду с изменением формы кривых  $\sigma(V)$  может свидетельствовать об перераспределении заряда примесей и/или механизма пиннинга уровня Ферми на интерфейсе металл-полупроводник.

Полученные результаты позволяют заключить, что при  $N_{Te} > 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  уровень Ферми на интерфейсе металл-полупроводник смещается ближе к середине запрещенной зоны, что приводит к некоторому уменьшению высоты барьера Шоттки и изменению наклона ее барической зависимости, а после пересечения энергий, соответствующих  $L$ - и  $X$ -минимумам зоны проводимости, наклон барической зависимости высоты барьера и туннельного сопротивления меняет знак с положительного на отрицательный.

Значение описанных в этом разделе результатов в связи с задачей экспериментального исследования переходов металл-диэлектрик состоит в том, что они дают основания считать высоту барьера на интерфейсе металл-полупроводник свободным параметром. Это обстоятельство, в частности, оказалось существенным при количественном описании туннелирования в систему с ДЭГ, сформированную слоем приповерхностного  $\delta$ -легирования в структуре  $\text{Al}/n\text{-GaAs}:\delta(\text{Si})$ , результаты исследования которой изложены в отдельном разделе.

В этом же разделе описано экспериментально обнаруженное нами явление бистабильности туннельных характеристик.

В четвертой главе представлены результаты исследований ДЭГ в квантовой яме, образованной двумя гетеропереходами  $\text{GaSb}/\text{InAs}$  П[7, 13, 14].

Переход  $\text{GaSb}/\text{InAs}$ , относится к структурам с гетеропе-

реходами II-типа, применение которых, представляет интерес как возможная технологическая база для изготовления генераторов СВЧ диапазона (InAs/AlSb), детекторов ИК излучения (InAs/GaInSb), туннельных диодов (InAs/GaSb) и т.п. Кроме того, отсутствие одинаковых ионов по обе стороны от поверхности раздела предоставляет возможность строить два типа интерфейса - со связями типа InSb или GaAs. Свойства носителей в двумерных электронном и дырочном слоях зависят от поведения энергетических зон вблизи интерфейса. С учетом искривления краев зон вблизи интерфейса при нормальных условиях электроны в яме (InAs) и дырки в барьерах (GaSb) пространственно разделены, и подвижности носителей могут достигать весьма высоких значений. Концентрации электронов и дырок определяются с одной стороны, требованием постоянства уровня Ферми, а, с другой стороны, концентрацией поверхностных донорных уровней, расположенных достаточно высоко, причем электронная концентрация резко увеличивается с уменьшением расстояния от поверхности до квантовой ямы.

По мере увеличения давления происходит относительное поднятие дна зоны проводимости в яме и соотношение концентраций электронов и дырок изменяется в сторону уменьшения дырок. При некотором давлении дырки в барьерах исчезают и остаются только электроны в яме, т.е. полуметаллический (с двумя типами носителей) режим сменяется вырожденным полупроводниковым (с одним типом носителей). Дальнейшее повышение давления приводит к тому, что энергия Ферми электронов ограничивается уровнем энергии поверхностных донорных состояний, и число электронов начинает уменьшаться вплоть до перехода в режим изолятора.

В параграфе 4.1 описана модель квантовой ямы, использованная при анализе барической зависимости электронной концентрации, а в параграфе 4.2 представлены эксперимен-

тальные данные и процедура обработки результатов измерения константы Холла и поперечного магнетосопротивления в нулевом магнитном поле.

Исследовались образцы GaSb/InAs/GaSb с квантовыми ямами с различным соотношением между шириной ямы и толщиной защитного слоя и с различными типами интерфейса. Измерения компонент тензора магнетосопротивления образца в холловской конфигурации проводились на постоянном токе в диапазоне 1-15 мкА при двух ориентациях поля при температуре жидкого гелия в магнитном поле сверхпроводящего соленоида до 7 Т в диапазоне давлений до 25 кбар. По результатам измерений производился Фурье-анализ спектра осцилляций ШдГ и расчет концентрации. Поскольку из-за большой эффективной массы и малой подвижности дырок определить их концентрацию из осцилляций магнетосопротивления не удастся, дополнительно производилось определение концентрации и подвижности носителей в рамках классической модели с двумя типами носителей по измерениям эффекта Холла в слабых полях. Сопоставление результатов для электронной концентрации, полученных двумя этими способами, дает основания полагать, что и найденная дырочная концентрация достаточно надежна.

Фурье-спектр осцилляций содержит только один сильный пик, соответствующий электронной компоненте. Отдельный пик, соответствующий дыркам, обладающим меньшей концентрацией и подвижностью, разрешению не поддается. Поэтому, в качестве дополнительной возможности для оценки электронной и дырочной концентрации, использовалась оптимизационная процедура подгонки параметров двухкомпонентной модели к экспериментальным данным.

Результаты анализа спектра осцилляций и модельного расчета, описанные в параграфе 4.3, показывают монотонное снижение концентрации носителей с давлением, что согласуется с

взаимным расположением энергетических зон GaSb и InAs, и приводит к переходу от полуметаллического к полупроводниковому и, далее, к диэлектрическому режиму проводимости.

Концентрации, определенные для образца с интерфейсом типа GaAs, оказались заметно ниже, чем для образца с интерфейсом типа InSb, в то время как барические коэффициенты у них весьма близки ( $dn/dP = 0.49 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}/\text{kbar}$ ).

Данные для нулевого давления подтвердили существование поверхностных донорных состояний, которые, с одной стороны, поставляют избыток электронов в квантовую яму, а, с другой стороны, ограничивают положение уровня Ферми под давлением. В параграфе 4.4 данные, полученные под давлением использованы для оценки положения уровней и эффективной концентрации поверхностных состояний в зависимости от типа интерфейса.

В параграфе 4.5 зависящая от магнитного поля составляющая проводимости в полупроводниковом режиме (в отсутствие дырок) анализировалась в рамках представлений о слабой локализации в 2D-электронной системе. Путем численной многопараметрической нелинейной подгонки к экспериментальным данным при давлениях, соответствующих полупроводниковому режиму проводимости, были определены времена релаксации импульса и сбоя фазы. Для проверки надежности такой процедуры подгонки, было предпринято предварительное исследование ее сходимости и оценка погрешности при численной оценке параметров из весьма точных экспериментальных данных для 2D-электронов в кремниевой МОП-структуре, полученных при нулевом давлении в широком интервале температур и напряжений затвора ( $\equiv$  концентрации электронов).

В **пятой главе** представлены результаты анализа экспериментальных данных магнетотранспортных измерений на ДЭГ

в инверсионном слое кремниевых МОП-структур, полученных в широком интервале температур и концентраций П[9, 15–20]. Подобные измерения, являясь традиционными, проводились для того чтобы охарактеризовать аномальное “металлическое” состояние.

В параграфе 5.1 анализируется отрицательное магнитосопротивление, связанное со слабой локализацией и получена информация о характерном времени фазовой когерентности (или, что то же самое, о времени сбоя фазы)  $\tau_\varphi$  в условиях, когда аномальное металлическое состояние обусловлено электрон-электронным взаимодействием, а температурная зависимость проводимости имеет сильный аномальный металлический характер.

Для того, чтобы обойти трудности, связанные с неприменимостью существующей теории квантовых поправок при концентрации носителей, близкой к критическому значению  $n_c$ , соответствующие измерения были проведены при достаточно высокой концентрации носителей, при которой проводимость изменяется в пределах от 35 до 120 (в единицах  $e^2/h$ ), что соответствует области непосредственно ниже максимальной металлической проводимости, при которой область экспоненциального падения сопротивления сдвигается в сторону более высоких температур, и поведение определяется, главным образом, малыми членами порядка  $\ln(T)$  обоих знаков. В этом режиме отрицательное магнитосопротивление (ОМС) в малых полях связано, в основном, с эффектами слабой локализации.

Экспериментальные данные анализировались путем численной подгонки отрицательного магнитосопротивления к одноэлектронной модели 1 описывающей поправку к проводимости за счет слабой локализации. Значения для  $D$  и  $\tau$  определялись из температурной и концентрационной зависимости компонент тензора сопротивления. Определенное из наших экспериментов значение  $\alpha$  изменяется в пределах от 0,5 до 0,6. Это

свидетельствует о преобладании внутридолинного рассеяния над междолинным.

Было показано, что для различных значений концентрации носителей в диапазоне от  $5.4 \times 10^{11}$  до  $3.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ , время фазовой когерентности  $\tau_\varphi$  возрастает с 1 ps при 10К до 100 ps при 0.29 К, и в этом температурном интервале может быть аппроксимировано степенным законом  $\tau_\varphi \propto T^{-p}$ , причем при высоких температурах доминируют процессы электрон-электронного рассеяния на большие углы, которым соответствует значение  $p = 2$ , в то время как при низких температурах в неупорядоченных средах даже при  $k_F l \gg 1$  основными являются малоугловые процессы и  $p = 1$ .

Сравнение зависимости  $\tau_\varphi$  и времени релаксации импульса  $\tau$  от концентрации и от температуры (где  $\tau$  определялось при  $B=0$  и при  $T \rightarrow 0$  из проводимости  $\sigma$  при  $B = 0$  в соответствии с выражением  $\tau = m^* \sigma / ne^2$ ) показывает, что поведение  $\tau_\varphi$  и  $\tau$  существенно различно и не связано между собой и при конечной температуре. Это становится понятно, если учесть, что в основе упругих и неупругих процессов рассеяния лежат различные механизмы. Если первые происходят из-за взаимодействия с примесями и шероховатостью поверхности, то последние связаны с электрон-фононным и электрон-электронным рассеянием.

Существенное возрастание времени фазовой когерентности при понижении температуры должно было бы способствовать возникновению сильных квантовых эффектов. Тем не менее, в проводимости при больших концентрациях наблюдались только слабые изменения вида  $\ln(T)$  от 10К, когда время фазовой когерентности сравнимо с временем релаксации импульса, до 0.29К, когда  $\tau_\varphi$  на два порядка больше.

В параграфе 5.2 представлены результаты определения параметров носителей ДЭГ из результатов измерений шубниковских осцилляций в скрещенных магнитных полях на основе

выражения в соответствии с описанной в Гл.2 процедурой.

Была обнаружена немонотонная зависимость  $m^*g^*$  от поля  $B_{\parallel}$ , причем вблизи перехода металл-диэлектрик изменение достигало  $\sim 15\%$ , поэтому измерения  $m^*g^*$  проводились в при разных значениях  $B_{\parallel}$  и экстраполировались к  $B_{\parallel} = 0$ . Поскольку теория магнитоосцилляций для 2D жидкости находится в стадии развития, и, в частности точное выражение для  $T$ -зависимости амплитуды осцилляций еще дискутируется, для обработки данных мы использовали две различные модели. В первом случае, как и для газа невзаимодействующих электронов  $T_D$  и масса полагались независимыми от  $T$ . Во втором случае предполагалось, что  $T_D$  перенормируется от температуры пропорционально  $1/\tau$ . В результате мы получили два набора экспериментальных оценок для массы (верхняя и нижняя оценки, соответственно), различие между которыми становится заметным начиная с  $r_s \sim 6$ .

Полученные нами данные по зависимости  $m^*(r_s)$  расширяют ранее исследованный диапазон электронных плотностей. Значения  $g$ -фактора были получены путем деления  $g^*m^*$  на сглаженную аппроксимацию экспериментальной зависимости  $m^*(r_s)$ . Оценка  $\tau_{\varphi}$  была получена из измерений магнитосопротивления в режиме слабой локализации в диапазоне полей  $B_{\perp} = 0 - 0.1T$  при различных значениях величины тангенциальной компоненты поля  $B_{\parallel} = 0 - 8T$ . Для всех значений  $B_{\parallel}$  надлежащим выбором параметров удалось подогнать результаты измерений магнетосопротивления в режиме слабой локализации в диапазоне температур  $T = 0.2 - 1.1K$  при концентрации носителей  $n = (1.2 - 11) \times 10^{11} cm^{-2}$  к теоретической модели.

В параграфе 5.3 обсуждается вопрос о возможности спонтанной спиновой поляризации при уменьшении электронной плотности до критической для перехода металл-диэлектрик. Результаты наших измерений спиновой восприимчивости по-

казали, что, постепенно возрастая с уменьшением электронной плотности, она остается конечной при критической плотности  $n_c$ , хотя ее возрастание доходит до 5-6 раз. Наши результаты измерений восприимчивости с помощью осцилляционных эффектов соответствуют узкому интервалу энергий на уровне Ферми  $E = E_F \pm kT$ ; эти результаты хорошо согласуются с данными измерений[9] в сильном поле  $B \leq E_F/g\mu$ , параллельном 2D плоскости (т.е. в широком интервале энергий  $\sim E_F$ ). Отличие возникает только при экстраполяции результатов различных экспериментов в область более слабых концентраций  $n < n_c$ . Надо сказать, что в узкой окрестности  $n = n_c$  интерпретация экспериментов обоих типов не имеет четких теоретических обоснований. Возможные причины расхождений различных экспериментальных данных при  $n \rightarrow n_c$  помимо разных диапазонов энергий (слабые и сильные поля  $B_{\parallel}$ ), могут включать различный характер беспорядка в исследованных образцах.

В **шестой главе** представлены результаты измерений латеральной и туннельной проводимости 2D системы на основе полупроводниковой структуры Al/ $\delta S_i$ -GaAs с приповерхностным слоем дельта-легирования в условиях качественного изменения режима проводимости в результате воздействия высоких давлений П[21–27].

По сравнению с объемно легированным GaAs, для образцов с квантовой ямой, сформированной слоем приповерхностного дельта-легирования уровни размерного квантования располагаются выше дна зоны проводимости и, следовательно, локализация носителей на DX-центрах происходит при более низких давлениях, а увеличение высоты барьера с давлением приводит к дополнительному уменьшению концентрации 2D электронов в системе с приповерхностным дельта-легированием за счет изменения глубины потенциальной ямы.

В параграфе 6.1 представлены результаты предварительных исследований туннельных спектров, на которых отражено влияние давления на положение зон размерного квантования, и барических зависимостей сопротивления по дельта-слою, свидетельствующие о переходе ДЭГ в диэлектрическое состояние при давлении  $\approx 1.9$  ГПа. Оценка величины давления перехода и его ширины согласуется с предположением о том, что основной причиной возникновения диэлектрического состояния в дельта-слое является изменения зонной структуры GaAs под давлением, в частности, присутствии DX-центров, характерное для примесей замещения (Sn, Si, Te) в полупроводниках типа АЗВ5.

Параграф 6.2 посвящен описанию туннельных исследований, которые были проведены в более широком диапазоне давлений, включающем область перехода к диэлектрическому состоянию, и сочетались с измерениями проводимости дельта-слоя,

В параграфе 6.3 представлено влияние давления на многочастичные особенности в туннельных спектрах (аномалия при нулевом смещении, форма поляронных особенностей) в условиях изменения энергетического спектра и концентрации ДЭГ и формы самосогласованного потенциального барьера под давлением вплоть до перехода в диэлектрическое состояние, и показано, что АНС связана с появлением кулоновской щели в спектре вблизи перехода в диэлектрическое состояние.

В **Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

## Основные результаты работы

1. Разработана конструкция камеры высокого гидростатического давления до 2.5 ГПа типа цилиндр-поршень для низкотемпературных исследований;

2. Разработана методика измерений на постоянном токе спектров нормального туннелирования в систему на основе Al/ $\delta$ (Si)-GaAs с ДЭГ вблизи перехода металл-диэлектрик под давлением при величине туннельного сопротивления порядка 1 ГОм и латерального сопротивления  $\delta$ -слоя в несколько сотен МОм;
3. Разработан метод определения высоты барьера Шоттки и концентрации заряженных примесей непосредственно из туннельных вольтамперных характеристик, основанный на самосогласованном решении уравнений Пуассона и Шредингера для туннельного контакта металл-полупроводник с учетом возможности ионизации DX-центров сильным электрическим полем барьера и влияния обменного взаимодействия электронов на форму барьера Шоттки; предложенный метод определения высоты барьера модифицирован для определения барической зависимости последнего с учетом как известной зависимости ширины запрещенной зоны от давления так и участия выше лежащих  $L$ - and  $X$ -долин, а также присутствия DX центров;
4. Разработана новая методика осцилляционных измерений в скрещенных магнитных полях, позволяющая определять спиновую восприимчивость электронов в 2D системе из анализа интерференционной картины осцилляций Шубникова-де Гааза в широком диапазоне концентраций;
5. Получена зависимость высоты барьера Шоттки диодов Au/ $n$ -GaAs:Te от давления до 3 ГПа при сильном легировании ( $N_e \sim 5 - 7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). Показано, что при  $P \geq 2 \text{ GPa}$  происходит значительное изменение характера барической зависимости концентрации свободных электронов и высоты барьера, причем высота барьера, в от-

личие от слаболегированных переходов при низких давлениях, растет не так как ширина запрещенной зоны.

6. Обнаружена специфическая бистабильность туннельных характеристик структур на основе сильно легированного *GaAs* при гелиевых температурах в узкой области давлений порядка 2.0 – 2.2 ГПа, при которых происходит сближение минимумов  $\Gamma$ – L- и X-долин в зоне проводимости; подобная нестабильность наблюдается в случае барьеров в сплавных *p* – *n* диодах и барьеров Шоттки при объемном и дельта легировании.
7. Наблюдался переход под давлением в системе с квантовой ямой *GaSb/InAs/GaSb* от полуметаллического к полупроводниковому режиму проводимости и, далее, к состоянию изолятора, сопровождавшийся появлением области отрицательного магнитосопротивления, которая интерпретируется в рамках представлений о слабой локализации; из анализа осцилляций Шубникова-де Гааза и зависимости компонент тензора магнетосопротивления в рамках классической модели с двумя типами носителей определена барическая зависимость концентраций электронов и дырок, подвижности носителей и характерные времена релаксации импульса и сбоя фазы в системе с квантовой ямой *GaSb/InAs/GaSb* различной ширины и с разным типом интерфейса под давлением до 2,5 ГПа; Получена оценка зависимости уровней энергии и концентрации поверхностных состояний для этой системы от типа интерфейса.
8. Проанализированы данные по слабой локализации в кремниевых МОП-структурах с высокой концентрацией носителей в т.н. режиме металлической проводимости с контактом между 35 и 120  $e^2/h$  в широком интервале темпе-

ратур и обнаружено возрастание времени фазовой когерентности  $\tau_\varphi$  с 2 до 100 ps при понижении температуры от 10 до 0.29K;

9. Из анализа результатов измерений осцилляций Шубникова - де Гааза в широком диапазоне концентраций  $n = (1 - 50) \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2}$ , найдено, что спиновая восприимчивость, эффективная масса и эффективный  $g$ -фактор возрастают с понижением электронной плотности, но спонтанная спиновая поляризация в осцилляционных эффектах в Si-MДП структурах при  $n \geq n_c$  не наблюдается вплоть до минимальной изученной плотности  $n = 0.76 \times 10^{11}$ .
10. Исследован туннельный и латеральный транспорт в системе  $\text{Me}/\delta(\text{Si})\text{-GaAs}$  при высоких гидростатических давлениях, и обнаружен обратимый переход ДЭГ в дельта-слое в состояние диэлектрика, получена барическая зависимость положения зон размерного квантования и формы особенностей в туннельном спектре, обусловленных электрон-фононным и электрон-электронным взаимодействием вплоть до перехода металл-диэлектрик;
11. Показано, что переход к диэлектрическому режиму проводимости сопровождается изменением формы туннельной аномалии при нулевом смещении, связанной с появлением кулоновской щели в спектре двумерных носителей в  $\delta$ -слое.

В целом, перечисленные результаты дают основанную на экспериментальных исследованиях информацию о характере электронной проводимости двумерной электронной системы, сформированной в широком классе объектов, при переходе к диэлектрическому режиму, связанном с уменьшением концентрации носителей.

## Публикации по теме диссертации

1. А.Н. Вороновский, Е.М. Дижур, Е.С. Ицкевич, В.А. Сухопаров, Автономная камера высокого давления. Авт. свид. 929933 (1980)
2. А.Н.Вороновский, Е.М.Дижур, Е.С.Ицкевич, Особенности туннелирования в системе на основе GaAs при высоких давлениях. ЖЭТФ, **86**, с. 38-44 (1984)
3. E.M. Dizhur, A.N. Voronovsky, E.S. Itskevich, I.N. Kotel'nikov, and A.Ya. Schulman, Oscillations on Tunneling Conductance of Schottky-Barrier n-GaAs/Au Junctions. High Pressure Research, **9/10**, No.1-2, p.370-373 (1992)
4. Е.М. Дижур, А.Н. Вороновский, Е.С. Ицкевич, И.Н. Котельников, А.Я. Шульман, Осцилляции туннельной проводимости перехода n-GaAs(Te)/Au с барьером Шоттки. ЖЭТФ, **102**, 5(11), с.1553–1557 (1992)
5. Itskevich E.S., Voronovsky A.N., Dizhur E.M., Investigation of Quasiparticle spectra using Electron Topological Transition under Pressure. High Pressure Science and Technology, **1**, p.573-576 (1993).
6. E.M. Dizhur, A.N. Voronovskii, E.S. Itskevich, The peculiarities of the tunneling conductance and phonon induced features in tetrahedrally bonded semiconductors under pressure. High Pressure Research, **12**(4-6)+**13**(1-3), p.275-278,(1994).
7. E.M. Dizhur, E.S. Itskevich, L.M. Kashirskaya, A.N. Voronovsky, T. Malik, R.A. Stradling, W.T. Yuen, Galvanomagnetic measurements of the 2d electron-hole gas in GaSb/InAs/GaSb quantum wells under pressures up to 2.5 GPa. Physica Status Solidi, **198** (1), p.289-294, (1996).

8. M. E. Gershenson, V. M. Pudalov, H. Kojima, N. Butch, E. M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz and G. Bauer, Crossed magnetic fields technique for studying spin and orbital properties of 2d electrons in the dilute regime. *Physica E*: **12**, Issues 1-4, P.585-590, (2002).
9. Е.М. Дижур, А.В. Федоров, Туннельная спектроскопия на постоянном токе и цифровой метод анализа экспериментальных данных. ПТЭ, №4, 2005, с. 38-42.
10. A.Ya. Shul'man, S.D. Ganichev, E.M. Dizhur, I.N. Kotel'nikov, E. Zepezauer, and W. Prettl, Effect of electron heating and radiation pressure on tunneling across Schottky barrier due to giant near field of FIR laser radiation, *Physica B* **272**, p.442–447 (1999).
11. Ya. Shul'man, S. D. Ganichev, I. N. Kotel'nikov, E. M. Dizhur, W. Prettl, A. B. Ormont, Yu. V. Fedorov, E. Zepezauer, Near-zone field effect of FIR laser radiation on tunnel current through the Schottky barrier under plasma reflection condition. *Physica Status Solidi(a)* **175**, p.289–296 (1999).
12. E.M. Dizhur, A.Ya. Shul'man, I.N. Kotel'nikov, A.N.Voronovsky, Pressure Dependence of the Barrier Height in Tunnel n-GaAs/Au Junctions. *Physica Stat. Solidi(b)* **223**, p.129-137 (2001).
13. А.Н. Вороновский, Е.М.Дижур, Е.С. Ицкевич, Л.М. Каширская, Р.А. Стредлинг, Влияние давления на концентрацию квазидвумерных носителей в системе GaSb/InAs/GaSb с квантовыми ямами. ФТТ, **39** (4), с.723-726, (1997).
14. E.M. Dizhur, A.N. Voronovsky, The evidence of weak localization in 2DEG from studies of pressure induced semimetal-semiconductor-insulator transitions in GaSb/InAs/GaSb quantum wells. *Physica Status Solidi(b)* **211**, p.449 (1999).

15. G. Brunthaler, A. Prinz, G. Bauer, V.M. Pudalov, E.M. Dizhur, J. Jaroszynski, P. Glod, T. Dietl, Weak localization in the 2D metallic regime of Si-MOS. *Ann. Phys.*, **8**, p.579-584, (1999), cond-mat/9911011.
16. V. M. Pudalov, M. E. Gershenson, H. Kojima, N. Butch, E. M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz, and G. Bauer, The low-density spin susceptibility and effective mass of mobile electrons in Si inversion layers, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 196404 (2002), cond-mat/0105081
17. V.M. Pudalov, M. Gershenson, H. Kojima, G. Bauer, G. Brunthaler, A. Prinz, E. Dizhur, Direct measurements of the renormalized Zeeman energy of 2D electrons in Si over a wide range of densities, *Bulletin APS* **46** (1), p.991 (2001).
18. M. E. Gershenson, V. M. Pudalov, H. Kojima, N. Butch, E. M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz and G. Bauer, Crossed magnetic fields technique for studying spin and orbital properties of 2d electrons in the dilute regime, *Physica E*, **12**, 1-4, 2002, pp. 585-590
19. V. M. Pudalov, M. E. Gershenson, H. Kojima, N. Butch, E. M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz, and G. Bauer, Low-Density Spin Susceptibility and Effective Mass of Mobile Electrons in Si Inversion Layers. *Phys. Rev. Lett.* **88**, p.19640, (2002)
20. V.M. Pudalov, M. Gershenson, H. Kojima, N. Busch, E.M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz, G. Bauer, Reply to Comment on “Low-Density Spin Susceptibility and Effective Mass of Mobile Electrons in Si Inversion Layers”. *Phys. Rev. Lett.*, **89**, p.19702 (2002), cond-mat/0206278
21. E.M. Dizhur, A.N. Voronovsky, I.N. Kotel’nikov, S.E. Dizhur, M. N. Feiginov, Experimental Study of Pressure Influence on

- Tunnel Transport into 2DEG. *phys. stat. sol.(b)* **235**, No. 2, p.531-535 (2003), cond-mat/0209407
22. I.N. Kotel'nikov, E. M. Dizhur, A. N. Voronovsky, S. E. Dizhur, V.A. Kokin and M. N. Feiginov, Tunneling spectroscopy of 2DES in near-surface delta-doped GaAs at high pressure. Proc. of 11th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", (St Petersburg, Russia, June 23-28, 2003), p117-118.
  23. Е.М. Дижур, А.Н. Вороновский, А.В. Федоров, И.Н. Котельников, С.Е. Дижур, Переход приповерхностного  $\delta$ -слоя туннельной структуры Al/ $\delta$ (Si)-GaAs в диэлектрическое состояние под давлением. Письма в ЖЭТФ, **80** (6), с.489-492 (2004)[ JETP Letters, **80**, No. 6, pp. 433-435, (2004)].
  24. E Dizhur, A Voronovsky, A Fedorov, I Kotel'nikov, and S Dizhur, Metal-insulator transition of the 2DEG in Al/ $\delta$ -Si:GaAs under pressure. *Physica E* **34**, 1-2, p.628-631 (2006).
  25. С.Е. Дижур, И.Н. Котельников, Е.М. Дижур, Отражение электронов при туннелировании и межподзонный полярон в двумерной электронной системе дельта-слоя в GaAs, *Радиотехника и Электроника*, Т.51, No5 (2006) с. 625-632
  26. S. E. Dizhur, I. N. Kotel'nikov, and E. M. Dizhur, Reflection of Electrons during Tunneling and an Intersubband Polaron in the 2D Electron System of a Delta-Layer in GaAs, *J. of Comm. Tech. and Electronics*, 2006, Vol. 51, No. 5, pp. 588-595.
  27. Eugene Dizhur, Anatoly Voronovsky, Igor Kotel'nikov, and Sergey Dizhur, Pressure-induced transition of 2DEG in d-doped GaAs to insulating state, *phys. stat. sol. (b)* **244**, No. 1, 453-459 (2007)

## Литература

- [1] Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003, с.77
- [2] E. Abrahams, S. V. Kravchenko, and M. P. Sarachik, // Rev. Mod. Phys. **73**, 251 (2001).
- [3] V.M.Pudalov, M.Gershenson, and H.Kojima, Chapter 19 in: “Fundamental Problems of Mesoscopic Physics. Interaction and Decoherence”, Eds. I.V.Lerner, B.L.Altshuler, and Y.Gefen, Nato sci. series (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004), p.309.
- [4] E. Abrahams, P.W. Anderson, D. C. Licciordello, and T. V. Ramakrishnan, Phys. Rev. Lett. **42**, p. 673 (1979).
- [5] D. Belitz and T. Kirkpatrick, Rev. Mod. Phys. **66**, p.261 (1994).
- [6] A. Husmann et al., Science **274**, p.1874 (1996).
- [7] S.Kawaji and Y.Kawaguchi, J.Phys.Soc.Japan, **53**(9), p.2868 (1984)
- [8] A. Isihara, L. Smrcka, J. Phys. C: Solid State Phys. **19**, 6777 (1986)
- [9] A. A. Shashkin et al., Phys. Rev. Lett. **87**, p.86801 (2001)
- [10] P.M. Mooney, J. Appl. Phys. **67**, R1 (1990)