

Криштопенко Сергей Сергеевич

**СПИНОВЫЕ И КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InAs/AlSb
С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

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

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт физики микроструктур РАН (ИФМ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Гавриленко Владимир
Изяславович

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор Владимир Яковлевич
Алёшкин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Голуб Леонид Евгеньевич
кандидат физико-математических наук
Водолазов Денис Юрьевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт физики твердого тела РАН

Защита состоится 8 декабря 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (607680, Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН.

Автореферат разослан “07” ноября 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м. н., профессор

Гайкович К.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последнее десятилетие повышенное внимание уделяется исследованию двумерных (2D) гетероструктур на основе узкозонных полупроводников, характеризующихся высокой подвижностью носителей заряда, так и большим спиновым расщеплением в энергетическом спектре в нулевом магнитном поле. Такие гетероструктуры представляют интерес для создания быстродействующих транзисторов, коротковолновых квантовых каскадных лазеров, резонансно-туннельных диодов, детекторов, работающих в дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах, а также приборов спинтроники. Для объяснения широкого круга спин-зависимых явлений, наблюдаемых в 2D системах, необходимо знать устройство зонного спектра носителей заряда и плотность состояний на уровне Ферми, а также роль e - e взаимодействия в этих явлениях.

Спин-зависимые явления в полупроводниковых гетероструктурах с 2D электронным газом можно условно разделить на два широких класса. К первому классу относятся “одноэлектронные” эффекты, связанные со спин-орбитальным взаимодействием в системе, к другому классу относятся коллективные эффекты, обусловленные кулоновским взаимодействием 2D носителей зарядов. Большинство методов исследования зонной структуры полупроводниковых систем с 2D электронным газом основаны на магнитотранспортных и магнитооптических экспериментах, эффекты кулоновского взаимодействия в которых различные.

В магнитооптике при резонансном поглощении электромагнитной волны 2D электронным газом происходит рождение квазиэлектрон-квазидырочных пар, в результате система переходит из основного состояния в возбужденное состояние. Для коллективных возбуждений в 2D электронном газе существуют две симметричные теоремы о влиянии двухчастичного взаимодействия на энергию поглощения в циклотронном и спиновом резонансе. В соответствии с теоремой Кона [1] в 2D системе с полной трансляционной симметрией e - e взаимодействие не оказывает влияния на энергию поглощения в циклотронном резонансе (ЦР). Согласно теореме Лармора [2] в 2D системе с вращательной инвариантностью в спиновом пространстве e - e взаимодействие не изменяет энергию поглощения в спи-

новом резонансе (СР), что позволяет определять величину одноэлектронного g -фактора в 2D электронном газе в отсутствие спин-орбитального взаимодействия. В узкозонных гетероструктурах с квантовыми ямами (КЯ), в которых подзоны размерного квантования характеризуются сильной непараболическостью и в которых проявляются эффекты, связанные со спин-орбитальным взаимодействием, теоремы Кона и Лармора должны нарушаться [2-7]. Теоретических исследований влияния e - e взаимодействия на ЦР и СР в узкозонных КЯ до настоящего времени не проводилось.

В магнитотранспортных экспериментах измеряется статическая проводимость, которая определяется основным состоянием 2D электронного газа, т. е. спектром квазичастиц в магнитном поле, перенормированным кулоновским взаимодействием. Исследование магнитотранспорта в системах с 2D электронным газом в сильных магнитных полях позволяет определять величину спинового расщепления на уровне Ферми в спектре квазичастиц. Например, анализ зеemanовского расщепления осцилляций Шубникова-де Гааза, позволяет определять величину g -фактора квазичастиц, который может значительно отличаться от значений, измеряемых в СР. Данное наблюдаемое увеличение “магнитотранспортного” g -фактора связывается с обменным взаимодействием 2D электронов [8, 9]. В существующих теоретических работах [8-11] для описания одночастичных состояний использовался гамильтониан 2×2 , содержащий два феноменологических параметра – эффективную массу и g -фактор носителей заряда. Таким гамильтонианом хорошо описываются одноэлектронные состояния только в гетероструктурах с параболическим законом дисперсии в подзонах размерного квантования. Расчёты обменного усиления g -фактора квазичастиц в узкозонных КЯ, закон дисперсии в подзонах размерного квантования которых характеризуется сильной непараболическостью, до настоящего времени не проводились.

Типичными представителями 2D систем на основе узкозонных полупроводников являются гетероструктуры InAs/AlSb с квантовыми ямами. Гетероструктуры InAs/AlSb обладают малой величиной эффективной массы электронов в КЯ InAs порядка 0,03 от массы свободного электрона [12], большими значениями g -фактора [13] и высокой подвижностью электронов, достигающей $3 \cdot 10^4$ см²/В·с при $T = 300$ К и $9 \cdot 10^5$ см²/В·с при $T = 4,2$ К

[14]. В данных гетероструктурах квантовая яма для электронов оказывается очень глубокой (более 2 эВ для электронов Г-долины). Хорошо известно, что даже в номинально нелегированных структурах InAs/AlSb присутствует 2D электронный газ с концентрацией порядка 10^{12} см^{-2} [14, 15]. В качестве “поставщиков” электронов в КЯ InAs рассматриваются глубокие доноры, связанные с дефектами в AlSb и поверхностные доноры в покрывающем слое GaSb, выращиваемом поверх барьера AlSb для предотвращения его окисления на воздухе [14-16]. “Встроенное” электрическое поле пространственно разделённых доноров в покрывающем слое GaSb и в барьерах AlSb и 2D электронов искажает профиль КЯ, что в свою очередь, через спин-орбитальное взаимодействие приводит к расщеплению спектра 2D электронов в КЯ AlSb/InAs/AlSb даже в отсутствие магнитного поля [A36]. В гетероструктурах InAs/AlSb экспериментально наблюдаются эффекты, связанные как со спин-орбитальным расщеплением энергетического спектра 2D электронных состояний [17, 18], так и с непараболичностью подзон размерного квантования [12], что делает их привлекательными для экспериментальных исследований нарушения теорем Кона и Лармора.

Замечательной особенностью гетероструктур InAs/AlSb является биполярная остаточная фотопроводимость (ОФП), наблюдаемая при низких температурах [19, 20]. При воздействии на гетероструктуру инфракрасным излучением наблюдается положительная ОФП, а при освещении в видимом диапазоне наблюдается отрицательная ОФП. Используя явление ОФП, можно обратимым образом в несколько раз изменять концентрацию 2D электронов в КЯ AlSb/InAs/AlSb и, соответственно, “встроенное” электрическое поле и заселённость спиновых подзон, что позволяет управлять не только эффектами спин-орбитального взаимодействия, но и контролировать проявление эффектов коллективного взаимодействия в магнитотранспорте, ЦР и спиновом резонансе. Это открывает широкие возможности для спиновой инженерии.

Цели работы

- исследование ОФП и асимметрии “встроенного” электрического поля в гетероструктурах InAs/AlSb с двойными КЯ;
- исследование влияния “встроенного” электрического поля и e - e взаимодействия на закон дисперсии электронов и спиновое расщепление в подзонах размерного квантования в одиночной КЯ AlSb/InAs/AlSb в нулевом магнитном поле;
- исследование спектра квазичастиц и плотности состояний на уровне Ферми в гетероструктурах InAs/AlSb. Определение g -фактора квазичастиц при различных значениях концентрации 2D электронов, магнитного поля и ширины уровней Ландау;
- исследование влияния e - e взаимодействия на энергию спинового экситона в длинноволновом пределе (нарушение теоремы Лармора) в гетероструктурах InAs/AlSb. Расчёт “магнитооптического” g -фактора 2D электронов при различных значениях магнитного поля и ширины уровней Ландау;
- исследование циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с одной и двумя заполненными подзонами. Выявление эффектов e - e взаимодействия в спектрах ЦР.

Научная новизна

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Прямым образом продемонстрирована сильная несимметричность гетероструктур InAs/AlSb, вызванная “встроенным” электрическим полем. Выполненные самосогласованные расчёты энергетического профиля двойной КЯ позволили определить значения концентраций ионизованных доноров с обеих сторон от квантовых ям и конкретизировать предложенный ранее механизм биполярной ОФП в данных гетероструктурах.
2. Впервые рассчитан энергетический спектр 2D электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с асимметричным профилем КЯ в приближении Хартри-Фока. Показано, что обменное взаимодействие, приводя к уменьшению энергии электронов в подзонах, увеличивает расстояние между подзонами и величину спин-орбитального расщепления спектра. Продemonстрирована

нелинейная зависимость константы расщепления Рашбы при фермиевском волновом векторе от концентрации 2D электронов.

3. Впервые теоретически исследовано обменное усиление g -фактора в гетероструктурах InAs/AlSb. Показано, что непараболичность закона дисперсии приводит к обменному усилению g -фактора на уровне Ферми не только при нечётных, но и при чётных факторах заполнения уровней Ландау. Продемонстрировано, что величина обменного усиления, амплитуда и форма осцилляций g -фактора квазичастиц определяется экранированным e - e взаимодействием и величиной уширения уровней Ландау вследствие случайного потенциала.

4. Теоретически исследовано влияние e - e взаимодействия на энергетический спектр квазичастиц в гетероструктурах InAs/AlSb с КЯ в зависимости от ширины уровней Ландау. Показано, что учёт обменного взаимодействия между электронами приводит к искажению монотонной зависимости уровней Ландау от магнитного поля и к появлению особенностей в спектре квазичастиц при целочисленных факторах заполнения, связанных с экранировкой кулоновского взаимодействия в 2D электронном газе. Продемонстрировано, что обменное взаимодействие в условиях сильного перекрытия расщеплённых по спину уровней Ландау приводит к расщеплению плотности состояний на два пика, соответствующих вкладам разных уровней, и перенормирует факторы заполнения спин-расщеплённых уровней Ландау, пересекающихся с уровнем Ферми.

5. На примере КЯ AlSb/InAs/AlSb, впервые продемонстрировано нарушение теоремы Лармора в квантовых ямах на основе узкозонных полупроводников с симметричным и асимметричным профилем “встроенного” электрического поля. Исследовано влияние спинового расщепления Рашбы и обменного взаимодействия в 2D электронном газе в гетероструктурах InAs/AlSb на энергию поглощения в спиновом резонансе при различной ширине уровней Ландау. Показано, что величина “магнитооптического” g -фактора в гетероструктурах InAs/AlSb, измеряемая в спиновом резонансе, осциллирует в магнитном поле и совпадает с g -фактором квазичастиц при чётных факторах заполнения уровней Ландау.

6. В гетероструктурах InAs/AlSb с 2D электронным газом обнаружено расщепление линии ЦР, значительно превышающее “одноэлектронное”

значение, рассчитанное с использованием 8-зонного $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ гамильтониана, что указывает на нарушение теоремы Кона вследствие e - e взаимодействия в непараболической подзоне размерного квантования. При факторах заполнения $\nu < 1$ обнаружено увеличение энергии циклотронных переходов при уменьшении концентрации 2D электронов, превышающее сдвиг линии ЦР, связанный с уширением уровней Ландау.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в получении нового научного знания о проявлении спиновых и коллективных эффектов в узкозонных полупроводниковых гетероструктурах с квантовыми ямами. Теоретически исследована асимметрия “встроенного” электрического поля и его влияния на спиновое расщепление закона дисперсии в подзонах размерного квантования. Продемонстрирована принципиальная возможность управления “встроенным” электрическим полем и, соответственно, спиновым расщеплением спектра в нулевом магнитном поле с помощью света, что является актуальным для создания различных приборов спинтроники. Впервые проведено теоретическое исследование влияния e - e взаимодействия на уровни Ландау квазичастиц и плотность состояний на уровне Ферми в гетероструктурах InAs/AlSb. В работе представлена теория обменного усиления g -фактора при нулевой температуре в гетероструктурах, выращенных на основе узкозонных полупроводников, с одной заполненной подзоной размерного квантования. Расчёты “магнитооптического” g -фактора, измеряемого в спиновом резонансе в гетероструктурах InAs/AlSb, впервые продемонстрировали нарушение теоремы Лармора в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе узкозонных полупроводников. Проведенные исследования циклотронного резонанса в образцах с высокой подвижностью 2D электронного газа в квантующих магнитных полях при температуре 2 К позволили обнаружить свидетельства нарушения теоремы Кона в гетероструктурах InAs/AlSb.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании новых электронных и оптоэлектронных приборов, а также приборов спинтроники на основе гетероструктур InAs/AlSb с квантовыми ямами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами и покрывающим слоем GaSb присутствует “встроенное” асимметричное электрическое поле, которое приводит к спиновому расщеплению Рашбы в подзонах размерного квантования. Напряжённость “встроенного” электрического поля можно обратимым образом изменять за счёт эффекта ОФП.
2. Обменное усиление g-фактора квазичастиц в узкозонных гетероструктурах с квантовыми ямами имеет место не только при нечётных, но и при чётных факторах заполнения уровней Ландау, причем магнитного поле, при котором достигается максимальное значение g-фактора, соответствует нечётным факторам заполнения лишь в отсутствие или при небольшом перекрытии плотностей состояний спин-расщеплённых уровней Ландау.
3. В узкозонных гетероструктурах с симметричными и асимметричными квантовыми ямами теорема Лармора нарушается. Влияние обменного взаимодействия в 2D электронном газе на энергию поглощения в спиновом резонансе зависит от величины спинового расщепления Рашбы.
4. В узкозонных гетероструктурах с КЯ теорема Кона нарушается. Энергия поглощения в циклотронном резонансе в гетероструктурах InAs/AlSb зависит от номера уровней Ландау, индекса подзоны размерного квантования и величины обменного взаимодействия в 2D электронном газе.

Личный вклад автора

- Равнозначный (совместно В.Я.Алешкиным) в проведение расчетов энергетических спектров и эффективных масс электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами [A2, A7, A14-A17, A20].
- Определяющий в исследовании спинового расщепления Рашбы и исследовании магнитотранспорта в гетероструктурах InAs/AlSb при температуре 0.2 К [A1, A4, A12, A21, A22, A24, A31, A32, A37].
- Основной в проведение расчетов уровней Ландау 2D электронов и энергии циклотронных переходов в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами и интерпретацию особенностей, наблюдаемых в спектрах циклотронного резонанса структур [A3, A5, A6, A8-A11, A13, A15-A20, A23, A26-A28, A30, A33].

— Основной в проведение расчетов энергетических спектров электронов в асимметричных гетероструктурах InAs/AlSb с двойными квантовыми ямами и анализ результатов экспериментальных исследований спектров остаточной фотопроводимости в этих структурах [A25, A29, A34].

— Определяющий в проведение теоретических исследований эффектов электрон-электронного взаимодействия в магнитотранспортных экспериментах и спиновом резонансе в гетероструктурах InAs/AlSb [A35, A36, A38-A40].

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на 12-й Международной конференции по узкозонным полупроводникам (Тулуза, Франция 2005); 9^{ой}, 10^{ой}, 11^{ой} Научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород 2005, 2006, 2007); 14^{ой}, 15^{ой}, 17^{ой}, 18^{ой} Международных симпозиумах “Наноструктуры: физика и технология” (Санкт-Петербург 2006, 2007, Минск 2009, Санкт-Петербург 2010); 8^{ой} Российской конференции по физике полупроводников (Екатеринбург 2008); конференции молодых учёных “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики” (Нижний Новгород, 2008); Международном оптическом конгрессе “Оптика – XXI век” (Санкт-Петербург, 2008); 12^{ой} Школе молодых учёных “Актуальные проблемы физики” (Звенигород, 2008); 9^{ой} Международной конференции по исследованиям в сильных магнитных полях (Дрезден, Германия 2009); 16^{ой} Международной конференции по динамике электронов в полупроводниках, оптоэлектронике и наноструктурах (Монпелье, Франция 2009); 8-13 Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург 2006-2011); 14^{ой} Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2009); 10-15 Международных симпозиумах “Нанофизика и наноэлектроника” (Нижний Новгород 2005-2011); Московском международном симпозиуме по магнетизму (Москва 2011), а также на семинарах ИФМ РАН, ННГУ и Лаборатории сильных магнитных полей (Тулуза, Франция).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 38 печатных работ, в том числе 6 статей в реферируемых журналах и 32 публикации в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и школ.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Объём диссертации составляет 176 страниц, включая 83 рисунка и 3 таблицы. Список цитированной литературы включает 133 наименования, список работ автора по теме диссертации - 40 наименований.

Основное содержание работы

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

В **Главе 1** проводится обзор работ, посвящённых исследованию остаточной фотопроводимости и различным спин-зависимых явлениям в гетероструктурах с 2D электронным газом. В первом разделе приводятся основные сведения о влиянии спин-орбитального взаимодействия на расщепление энергетического спектра 2D электронов в нулевом магнитном поле и рассматриваются работы, посвящённые исследованию биений осцилляций Шубникова-де Гааза в гетероструктурах InAs/AlSb. Во втором разделе представлен обзор исследований остаточной фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами. Третий раздел первой главы посвящён обменному усилению g-фактора в 2D электронном газе. Рассматриваются работы по экспериментальному исследованию g-фактора квазичастиц в КЯ AlSb/InAs/AlSb. Четвёртый раздел посвящён рассмотрению различных коллективных возбуждений в 2D электронном газе в режиме эффекта Холла. Проводится обзор теоретических работ по исследованию эффектов электрон-электронного взаимодействия в спиновом и циклотронном резонансах в гетероструктурах с 2D электронным газом (нарушение теорем Лармора и Кона).

Глава 2 посвящена исследованию асимметрии “встроенного” электрического поля и спинового расщепления Рашбы в гетероструктурах

InAs/AlSb в нулевом магнитном поле. В первой части Главы 2 описывается самосогласованное приближение Хартри в узкозонных гетероструктурах с квантовыми ямами. Во второй части приведены результаты исследований остаточной фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb с двойными квантовыми ямами. Продемонстрирована сильная несимметричность “встроенного” электрического поля в гетероструктурах InAs/AlSb в условиях положительной остаточной фотопроводимости. В третьей части второй главы представлены расчёты энергетического спектра 2D электронов и константы спинового расщепления Рашбы в КЯ AlSb/InAs/AlSb в присутствии асимметричного “встроенного” электрического поля. Из фурье-анализа осцилляций Шубникова-де Гааза в гетероструктурах InAs/AlSb при температуре 0.2 К определена константа спинового расщепления Рашбы, значение которой сравнивается с результатами теоретических расчётов.

Глава 3 посвящена исследованию эффектов обменного взаимодействия, проявляющихся в магнитотранспортных экспериментах в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами. В первой части третьей главы описывается приближение Хартри-Фока в магнитном поле с учётом эффектов экранирования в 2D электронном газе в КЯ AlSb/InAs/AlSb. Во второй части приведены результаты исследований влияния электрон-электронного взаимодействия на энергетический спектр квазичастиц и плотность состояний на уровне Ферми в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами в зависимости от ширины уровней Ландау. В третьей части главы представлены расчёты обменного усиления g-фактора квазичастиц в КЯ AlSb/InAs/AlSb. Проводится сравнение результатов расчётов и экспериментальных значений g-фактора в гетероструктурах InAs/AlSb, полученных в различных магнитотранспортных экспериментах.

В **Главе 4** представлены результаты теоретического исследования влияния спинового расщепления Рашбы и обменного взаимодействия в 2D электронном газе на энергию поглощения в спиновом резонансе в гетероструктурах InAs/AlSb. В первой части четвёртой главы получено уравнение Шрёдингера для магнитного экситона в узкозонных гетероструктурах с 2D электронным газом. Во второй части представлены расчёты энергии спинового экситона в КЯ AlSb/InAs/AlSb в коротковолновом и длинноволновом пределе. Продемонстрировано нарушение теоремы Лармора в гетероструктурах InAs/AlSb с симметричным и асимметричным “встроенным” элек-

трическим полем. В третьей части главы приведены результаты расчёта g -фактора, измеряемого в спиновом резонансе, при различных значениях ширины уровней Ландау, магнитного поля и концентрации 2D электронов в гетероструктурах InAs/AlSb.

Глава 5 посвящена исследованию циклотронного резонанса электронов в гетероструктурах InAs/AlSb. В первой и второй частях пятой главы представлены результаты исследований циклотронных переходов в КЯ AlSb/InAs/AlSb различной ширины с одной и двумя заполненными подзонами размерного квантования. Проводится сравнение экспериментальных энергий переходов с теоретическими значениями, полученными в приближении Хартри. Третья часть главы посвящена исследованию влияния электрон-электронного взаимодействия на энергию поглощения в циклотронном резонансе в гетероструктурах InAs/AlSb. Продемонстрировано, что учёт кулоновского взаимодействия в 2D электронном газе приводит к нарушению теоремы Кона в КЯ AlSb/InAs/AlSb.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. В гетероструктурах InAs/AlSb с двойными квантовыми ямами в широкой области спектра 0,2 – 6 эВ исследована положительная и отрицательная остаточная фотопроводимость при $T = 4,2$ К. С помощью измерений осцилляций Шубникова-де Гааза и эффекта Холла определены значения концентраций 2D электронов в каждой из квантовых ям. Установлено, что положительная остаточная фотопроводимость обусловлена переносом электронов с поверхностных доноров в покрывающем слое GaSb в двойную квантовую яму. Выполненные самосогласованные расчёты энергетического профиля двойной квантовой ямы на основе 8-зонного $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ гамильтониана позволили определить значения концентраций ионизованных доноров с обеих сторон от квантовых ям и прямым образом продемонстрировать сильную несимметричность гетероструктур InAs/AlSb, вызванную “встроенным” электрическим полем.

2. В приближениях Хартри и Хартри-Фока с использованием 8-зонного $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ гамильтониана исследовано влияние e - e взаимодействия на энергетиче-

ский спектр 2D электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с одиночными квантовыми ямами и “встроенным” асимметричным электрическим полем. Показано, что обменное взаимодействие, приводя к уменьшению энергии размерного квантования, увеличивает расстояние между подзонами и величину спин-орбитального расщепления спектра. Продемонстрирована нелинейная зависимость константы спинового расщепления Рашбы при фермиевском волновом векторе от концентрации 2D электронов. Экспериментально исследованы осцилляции Шубникова-де Гааза при $T = 0,2$ К в магнитных полях до 6 Т, определены концентрации 2D электронов в разных спиновых подзонах и константа спинового расщепления Рашбы, значение которой хорошо согласуется с результатами расчётов.

3. Впервые теоретически исследовано влияние $e-e$ взаимодействия на энергетический спектр квазичастиц в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами с одной заполненной подзоной размерного квантования в зависимости от ширины уровней Ландау. Продемонстрировано, что учёт обменного взаимодействия приводит к искажению монотонной зависимости энергии уровней Ландау от магнитного поля и к появлению особенностей в спектре квазичастиц при целочисленных факторах заполнения, связанных с экранировкой кулоновского взаимодействия в 2D электронном газе. Обнаружено, что обменное взаимодействие в условиях сильного перекрытия расщеплённых по спину уровней Ландау приводит к расщеплению плотности состояний на два пика, соответствующих вкладам разных уровней, и перенормирует факторы заполнения спин-расщеплённых уровней Ландау, пересекающихся с уровнем Ферми.

4. Впервые с использованием 8-зонного $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ гамильтониана выполнены расчёты обменного усиления g -фактора квазичастиц в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами с одной заполненной подзоной размерного квантования. Показано, что непараболичность закона дисперсии приводит к обменному усилению g -фактора на уровне Ферми не только при нечётных, но и при чётных факторах заполнения уровней Ландау, причем значения магнитного поля, при которых достигается максимальное усиление g -фактора, соответствует нечётным факторам заполнения лишь в отсутствие или при небольшом перекрытии плотностей состояний спин-расщеплённых уровней Ландау.

5. На примере квантовой ямы AlSb/InAs/AlSb впервые продемонстрировано нарушение теоремы Лармора как в асимметричных, так и в симметричных квантовых ямах на основе узкозонных полупроводников. Исследовано влияние спинового расщепления Рашбы и обменного взаимодействия в 2D электронном газе в гетероструктурах InAs/AlSb на энергию поглощения в спиновом резонансе при различной ширине уровней Ландау. Обнаружена расходимость значений g -фактора, измеряемых в спиновом резонансе, в слабых магнитных полях, связанная с влиянием обменного взаимодействия в 2D электронном газе. Показано, что величина “магнитооптического” g -фактора осциллирует в магнитном поле и совпадает с g -фактором квазичастиц при чётных факторах заполнения уровней Ландау.

6. Исследован ЦР в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами в сильных магнитных полях до 55 Т. При факторах заполнения уровней Ландау $\nu < 4$ обнаружено расщепление линии ЦР, значительно превышающее “одноэлектронное” значение, рассчитанное с использованием 8-зонного $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ гамильтониана, что указывает на нарушение теоремы Кона вследствие e - e взаимодействия в непараболической подзоне размерного квантования. При факторах заполнения $\nu < 1$ обнаружено увеличение энергии циклотронных переходов при уменьшении концентрации 2D электронов, превышающее сдвиг линии ЦР, связанный с уширением уровней Ландау.

7. Проведены теоретические исследования энергетического спектра электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами с двумя заполненными подзонами. Показано, что наблюдаемое расщепление линии ЦР связано с разностью циклотронных энергий в подзонах размерного квантования в отличие от образцов с одной заполненной подзоной, где наблюдаемое расщепление связано с неэквидистантностью уровней Ландау в первой подзоне.

Список цитированной литературы

- [1] W. Kohn, *Cyclotron Resonance and de Haas-van Alphen Oscillations of an Interacting Electron Gas*. // Phys. Rev. **123**, 1242-1244 (1961).
- [2] Marco Califano, *Breaking of Larmor's theorem in quantum Hall states with spin-orbit coupling*. / Marco Califano, Tapash Chakraborty, Pekka Pietiläinen, C.-M. Hu // Phys. Rev. B **73**, 113315 (2006).

- [3] A. H. MacDonald, *Cyclotron resonance in two dimensions: Electron-electron interactions and band nonparabolicity*. / A. H. MacDonald, C. Kallin // Phys. Rev. B **40**, 5795-5798 (1989).
- [4] K. Asano, *Two-component cyclotron resonance in quantum Hall systems*. / K. Asano, T. Ando // Phys. Rev. B **58**, 1485-1498 (1998).
- [5] Yu. A. Bychkov, *Magnetoplasmons and band nonparabolicity in two-dimensional electron gas*. / Yu. A. Bychkov, G. Martinez // Phys. Rev. B **66**, 193312 (2002).
- [6] Yu. A. Bychkov, *Magnetoplasmons and cyclotron resonance in a two-dimensional electron gas*. / Yu. A. Bychkov, G. Martinez // Phys. Rev. B **72**, 195328 (2005).
- [7] R. Roldán, *Spin-flip excitations, spin waves, and magnetoexcitons in graphene Landau levels at integer filling factors*. / R. Roldán, J.-N. Fuchs, M. O. Goerbig // Phys. Rev. B **82**, 205418 (2010).
- [8] J. F. Janak, *g Factor of the Two-Dimensional Interacting Electron Gas*. // Phys. Rev. **178**, 1416-1418 (1969).
- [9] T. Ando, *Theory of Oscillatory g Factor in an MOS Inversion Layer under Strong Magnetic Fields*. / T. Ando, Y. Uemura // J. Phys. Soc. Japan **37**, 1044-1052 (1974).
- [10] W. Xu, *The low-temperature self-consistent g factor for heterostructures in strong magnetic fields*. / W. Xu, P. Vasilopoulos, M. P. Das, F. M. Peeters // J. Phys.: Condens. Matter **7**, 4419-4432 (1995).
- [11] J. H. Oh, *Variational quantum Monte Carlo calculation of the effective spin Landé g factor in a two-dimensional electron system*. / J. H. Oh, K. J. Chang // Phys. Rev. B **54**, 4948-4952 (1996).
- [12] M. J. Yang, *Enhancement of cyclotron mass in semiconductor quantum well*. / M. J. Yang, P. J. Lin-Chung, B. V. Shanabrook, J. R. Waterman, R. J. Wagner, W. J. Moore // Phys. Rev. B. **47**, 1691-1694 (1993).
- [13] V. N. Zverev, *Magnetotransport properties of two-dimensional electron gas in AlSb/InAs quantum well structures designed for device applications*. / V. N. Zverev, M. Muhammad, S. Rahman, P. Debray, M. Saglam, J. Sigmund, H. L. Hartnagel // J. Appl. Phys. **96**, 6353-6356 (2004).

- [14] G. Tuttle, *Electron concentrations and mobilities in AlSb/InAs/AlSb quantum wells*. / G. Tuttle, H. Kroemer, J.H. English // J. Appl. Phys. **65**, 5239 (1989).
- [15] J. Shen, *Remote n-type modulation doping of InAs quantum wells by “deep acceptors” in AlSb*. / J. Shen, J. D. Dow, S. Yu. Ren, S. Tehrani, H. Goronkin // J. Appl. Phys. **73**, 8313 (1993).
- [16] J. Shen, *Tamm states and donors at InAs/AlSb interfaces*. / J. Shen, H. Goronkin, J. D. Dow, S. Y. Ren // J. Appl. Phys. **77**, 1576 (1995).
- [17] S. D. Ganichev, *Experimental Separation of Rashba and Dresselhaus Spin Splittings in Semiconductor Quantum Wells*. / S. D. Ganichev, V. V. Bel'kov, L. E. Golub, E. L. Ivchenko, P. Schneider, S. Giglberger, J. Eroms, J. De Boeck, G. Borghs, W. Wegscheider, D. Weiss, W. Prettl // Phys. Rev. Lett. **92**, 256601 (2004).
- [18] W. Zawadzki, *Spin splitting of subband energies due to inversion asymmetry in semiconductor heterostructures*. / W. Zawadzki, P. Pfeffer // Semicond. Sci. Technol. **19**, R1 (2004).
- [19] Ch. Gauer, *Photoconductivity in AlSb/InAs quantum wells*. / Ch. Gauer, J. Scriba, A. Wixforth, J. P. Kotthaus, C. Nguyen, G. Tuttle, J. H. English, H. Kroemer // Semicond. Sci. Technol. **8**, S137-S140 (1993).
- [20] V. Ya. Aleshkin, *Spectra of Persistent Photoconductivity in InAs/AlSb Quantum-Well Heterostructures*. // V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, D. M. Gaponova, A. V. Ikonnikov, K. V. Marem'yanin, S. V. Morozov, Yu. G. Sadofyev, S. R. Johnson, Y.-H. Zhang // Semiconductors **39**, 22-26 (2005).

Основные публикации автора по теме диссертации

- [A1] С.С. Криштопенко, *Осцилляции субмиллиметровой фотопроводимости в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом*. / С.С. Криштопенко, А.В. Иконников, В.И. Гавриленко // Труды (девятой) Научной конференции по радиофизике. /Ред. А.В.Якимов. - Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2005, стр.167-168.
- [A2] A.V. Ikonnikov, *Cyclotron resonance study of InAs/AlSb quantum well heterostructures*. / A.V. Ikonnikov, S.S. Krishtopenko, K.E. Spirin, V.I. Gavrilenko, Yu.G. Sadofyev, J.P. Bird, S.R. Johnson, Y.-H. Zhang // “Narrow Gap Semiconductors”, eds J.Kono & J.Leotin, Institute of Physics Conference Series Number 187, published by Taylor & Franics, ISBN No 0750310162, 2006,

pp.579-584.

[A3] А.В. Иконников, *Исследование циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb в квантующих магнитных полях.* / А.В. Иконников, В.И. Гавриленко, В.Я. Алёшкин, С.С. Криштопенко // Труды (десятой) Научной конференции по радиофизике. /Ред. А.В.Якимов. - Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2006.

[A4] В.И. Гавриленко, *Осцилляции субмиллиметровой фотопроводимости в нелегированных гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом.* / В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, Ю.Г. Садофьев, S.R. Johnson, Y.-H. Zhang. // Материалы X Симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2006, стр.439-440.

[A5] В.Я. Алешкин, *Исследование циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами в квантующих магнитных полях.* / В.Я. Алешкин, Ю.Б. Васильев, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, Ю.Г. Садофьев, M.L. Sadowski, W. Кнап, S.R. Johnson, Y.-H. Zhang // Материалы X Симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2006, стр.86-87.

[A6] A.V. Ikonnikov, *Cyclotron resonance study of InAs/AlSb QW heterostructures in quantizing magnetic fields.* / A.V. Ikonnikov, Yu.B. Vasilyev, S.S. Krishtopenko, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, M.L. Sadowski, W. Кнап, Yu.G. Sadofyev, S.R. Johnson, Y.-H. Zhang // Proc. 14th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", Ioffe Institute, St.Petersburg, Russia, 2006, pp.172-173.

[A7] С.С. Криштопенко, *Циклотронный резонанс электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами.* / С.С. Криштопенко, В.Я. Алёшкин, В.И. Гавриленко // Тез. докл. VIII Всеросс. молодёжной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и нанoeлектронике, Санкт-Петербург, декабрь 2006, стр.57.

[A8] M.L. Orlov, *Cyclotron resonance study of InAs/AlSb QW heterostructures in quantizing magnetic fields.* / M.L. Orlov, A.V. Ikonnikov, Yu.B. Vasilyev, S.S. Krishtopenko, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, M.L. Sadowski, W. Кнап, Yu.G. Sadofyev // Proc. 15th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", Novosibirsk, Russia, June 25-29, 2007; Ioffe Institute, St.Petersburg, 2007, pp.214-215.

- [A9] В.Я. Алешкин, *Исследование циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами в квантующих магнитных полях.* / В.Я. Алешкин, Ю.Б. Васильев, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, М.Л. Орлов, Ю.Г. Садофьев, М.Л. Sadowski, W. Кнар. // XI Международный Симпозиум «Нанозлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2007, т.1. стр.57-59.
- [A10] В.Я. Алешкин, *Циклотронные переходы в гетероструктурах InAs/AlSb в ультраквантовом пределе.* / В.Я. Алешкин, Ю.Б. Васильев, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, М.Л. Орлов, Ю.Г. Садофьев, О. Drachenko, М. Goiran, М.Л. Sadowski, W. Кнар // XI Международный Симпозиум «Нанозлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2007, т.2. стр.297-298.
- [A11] В.И. Гавриленко, *Обменное усиление g-фактора в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом.* / В.И. Гавриленко, С.С. Криштопенко, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спирин // XI Международный Симпозиум «Нанозлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2007, т.2. стр.313-314.
- [A12] С.С. Криштопенко, *Спектр электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами в присутствии “встроенного” электрического поля.* / С.С. Криштопенко, В.И. Гавриленко, В.Я. Алёшкин // Труды XI научной конференции по радиофизике./Ред. А.В.Якимов. – Нижний Новгород: ННГУ, 2007, стр.110-112.
- [A13] В.Я. Алешкин, *Циклотронный резонанс 2D электронов и дырок в квантующих магнитных полях.* / В.Я. Алешкин, Ю.Б. Васильев, В.И. Гавриленко, Б.Н. Звонков, А.В. Иконников, Д.В. Козлов, С.С. Криштопенко, М.Л. Орлов, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спирин, М.Л. Sadowski, М. Goiran, W. Кнар // Тез. докл. 8 Росс. конф. по физике полупроводников, Екатеринбург, сентябрь 2007, стр.194.
- [A14] В.Я. Алешкин, *Оптическая ширина запрещённой зоны арсенида галлия в мегагауссных магнитных полях.* / В.Я. Алешкин, Н.В. Закревский, С.С. Криштопенко // Тез. докл. 8 Росс. конф. по физике полупроводников, Екатеринбург, сентябрь 2007, стр.64.
- [A15] С.С. Криштопенко, *Циклотронный резонанс электронов в легированных гетероструктурах InAs/AlSb с двумя заполненными подзонами.* / С.С. Криштопенко, В.Я. Алёшкин, В.И. Гавриленко // Тез. докл. IX Всеросс.

молодёжной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, декабрь 2007, стр.66.

[A16] В.И. Гавриленко, *Исследование магнитотранспорта и циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с различными толщинами квантовых ям.* / В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, А.А. Ластовкин, Ю.Г. Садофьев. // XII Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2008, т.2. стр.317-318.

[A17] С.С. Криштопенко, *Циклотронный резонанс электронов в легированных гетероструктурах InAs/AlSb с двумя заполненными подзонами.* // Тез. докл. конференции молодых учёных “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики”, Н. Новгород, 1-7 марта 2008, стр.90-91.

[A18] В.Я. Алёшкин, *Обменное усиление g-фактора в гетероструктурах InAs/AlSb.* / В.Я. Алёшкин, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спириин // ФТП, том 42, вып. 7, 2008, стр.846-851.

[A19] В.И. Гавриленко, *Терагерцовая спектроскопия полупроводниковых наноструктур.* / В.И. Гавриленко, В.Я. Алёшкин, А.В. Антонов, Л.В. Гавриленко, А.А. Дубинов, М.С. Жолудев, Б.Н. Звонков, А.В. Иконников, Д.В. Козлов, С.С. Криштопенко, Д.И. Курицын, А.А. Ластовкин, К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спириин // Сборник трудов Международного оптического конгресса “Оптика – XXI век”, Санкт-Петербург, 20-24 октября 2008, стр.286.

[A20] А.В. Иконников, *Циклотронный резонанс в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами.* / А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, А.А. Ластовкин, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спириин, М. Orlita // Сборник трудов Международного оптического конгресса “Оптика – XXI век”, Санкт-Петербург, 20-24 октября 2008, стр.291.

[A21] С.С. Криштопенко, *Спин-орбитальное расщепление спектра в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным неидеальным электронным газом.* / С.С. Криштопенко, В.И. Гавриленко, В.Я. Алёшкин // Тезисы XII Школы молодых учёных “Актуальные проблемы физики”, Звенигород, 23-26 ноября 2008, стр.31.

[A22] С.С. Криштопенко, *Спин-орбитальное расщепление спектра элек-*

тронов в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами. / С.С. Криштопенко, В.И. Гавриленко, В.Я. Алёшкин // Тез. докл. X Всеросс. молодёжной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 1-5 декабря 2008, стр.51.

[A23] В.Я. Алёшкин, *Циклотронный резонанс и эффекты обменного взаимодействия в гетероструктурах InAs/AlSb.* / В.Я. Алёшкин, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, К.Е. Спирин, Ю.Г. Садофьев, М. Orlita // XIII Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2009, т.1. стр.14-15.

[A24] С.С. Криштопенко, *Влияние электрон-электронного взаимодействия на энергетический спектр в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом.* / С.С. Криштопенко, В.И. Гавриленко, В.Я. Алёшкин // XIII Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2009, т.2. стр.366-367.

[A25] В.И. Гавриленко, *Остаточная фотопроводимость в гетероструктурах InAs/AlSb с двойными квантовыми ямами.* / В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, А.А. Ластовкин, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спирин // XIII Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2009, т.2. стр.434-435.

[A26] A.V. Ikonnikov, *Effects of electron-electron interaction on cyclotron resonance in InAs/AlSb QW heterostructures in quantizing magnetic fields.* / A.V. Ikonnikov, S.S. Krishtopenko, Yu.G. Sadofyev, V.I. Gavrilenko, M. Orlita // Proc. 17th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, Minsk, Belarus, June 22-26, 2009; Ioffe Institute, St.Petersburg, 2009, pp.76-77.

[A27] A. Ikonnikov, *Splitting of cyclotron resonance line in InAs/AlSb QW heterostructures in high magnetic fields: effects of electron-electron and electron-phonon interaction.* / A. Ikonnikov, S. Krishtopenko, V. Gavrilenko, Y. Sadofyev, Y. Vasilyev, M. Orlita, W. Knap, O. Drachenko, M. Helm // 9th Int. Conf. on Research in High Magnetic Fields, July 22-25, 2009, Dresden, Germany, p.118.

[A28] V.I. Gavrilenko, *Effects of electron-electron interaction on cyclotron resonance in InAs/AlSb quantum well heterostructures.* / V.I. Gavrilenko, A.V. Ikonnikov, S.S. Krishtopenko, Yu.G. Sadofyev, M. Orlita // Proceedings of 16th International Conference on Electron Dynamics In Semiconductors,

Optoelectronics and Nanostructures, August 24-28, 2009, Montpellier, France, p.157.

[A29] А.А. Ластовкин, *Остаточная фотопроводимость в гетероструктурах InAs/AlSb с двойными квантовыми ямами.* / А.А. Ластовкин, С.С. Криштопенко, А.В. Иконников // Тез. докл. XI Всеросс. молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 30 ноября-4 декабря 2009, стр.69.

[A30] В.И. Гавриленко, *Спектры циклотронного резонанса электронов в гетероструктурах InAs/AlSb в сверхсильных магнитных полях.* / В.И. Гавриленко, О. Драченко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спириин, Н. Schneider, М. Helm // XIV Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2010, т.1, стр.61-62.

[A31] К.Е. Спириин, *Спиновое расщепление в гетероструктурах HgTe/CdHgTe (013) с квантовыми ямами.* / К.Е. Спириин, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, В.И. Гавриленко, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов // XIV Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2010, т.2., стр.513-514.

[A32] A.V. Ikonnikov, *Spin splitting in HgTe/CdHgTe(013) quantum well heterostructures.* / A.V. Ikonnikov, К.Е. Spirin, S.S. Krishtopenko, V.I. Gavrilenko, S.A. Dvoretzkiy, N.N. Mikhailov // Proc. 18th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, June 21-26, 2010; Ioffe Institute, St.Petersburg, 2010, pp.214-215.

[A33] A. Ikonnikov, *Splitting of cyclotron resonance line in InAs/AlSb QW heterostructures in high magnetic fields: effects of electron-electron and electron-phonon interaction.* / A. Ikonnikov, S. Krishtopenko, V. Gavrilenko, Yu. Sadofyev, Yu. Vasilyev, M. Orlita, W. Knap // J. Low Temperature Physics, v. 159, 2010, pp.197-202.

[A34] В.И. Гавриленко, *Остаточная фотопроводимость в гетероструктурах InAs/AlSb с двойными квантовыми ямами.* / В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, С.С. Криштопенко, А.А. Ластовкин, К.В. Маремьянин, Ю.Г. Садофьев, К.Е. Спириин // ФТП, том 44, вып. 5, 2010, стр. 642-648.

[A35] С.С. Криштопенко, *Обменное усиление g-фактора в гетерострукту-*

рах *InAs/AlSb* с двумерным электронным газом. / С.С. Криштопенко, В.И. Гавриленко // Тез. докл. XII Всеросс. молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 25-29 октября 2010, стр. 75.

[A36] С.С. Криштопенко, *Электрон-электронное и спин-орбитальное взаимодействие в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом.* / С.С. Криштопенко, В.И. Гавриленко, М. Goiran // ФТП, том. 45, вып. 1, 2011, стр.111-119.

[A37] Н.В. Байдусь, *Спиновое расщепление в гетероструктурах InGaAs/InP (001) с квантовыми ямами.* / Н.В. Байдусь, С.С. Криштопенко, К.Е. Спирин, А.В. Иконников, А.А. Ластовкин, А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков, А.А. Перов, В.И. Гавриленко, В.Я. Демиховский, В.Т. Долгополов // Труды XV Межд. симп. «Нанозифика и наноэлектроника», Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2011, т.2., стр. 376-377.

[A38] S.S. Krishtopenko, *The g-factor enhancement in narrow-gap quantum well heterostructures.* / S.S. Krishtopenko, V.I. Gavrilenko, M. Goiran // The Book of Abstracts of Moscow Int. Symp. on Magnetism, Moscow, M.V. Lomonosov State University, 2011, p. 531.

[A39] S.S. Krishtopenko, *Theory of g-factor enhancement in narrow gap quantum well heterostructures.* / S.S. Krishtopenko, V.I. Gavrilenko, M. Goiran // J. Phys.: Condens. Matter **23**, 385601 (2011).

[A40] С.С. Криштопенко, *Эффекты электрон-электронного взаимодействия в спиновом резонансе 2D электронов в гетероструктурах InAs/AlSb.* / С.С. Криштопенко, А.В. Малыженков, А.В. Иконников, В.И. Гавриленко // Тез. докл. XIII Всеросс. молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 21-25 ноября 2011.

КРИШТОПЕНКО Сергей Сергеевич

**СПИНОВЫЕ И КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InAs/AlSb
С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

Автореферат

Подписано к печати 31.10.2011 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105