

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

На правах рукописи



Овешников Леонид Николаевич

**Эффект Шубникова – де Гааза и электрофизические свойства
структур с квантовой ямой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.2 \leq x \leq 1$), с различным
метаморфным буфером и магнитной примесью**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2016

Работа выполнена в Управлении метрологии и сертификации нанотехнологий и продукции nanoиндустрии в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Научный руководитель:

Кульбачинский Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости, физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

Научный консультант:

Аронзон Борис Аронович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Курчатовский комплекс НБИКС-технологий, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты:

Буга Сергей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физических свойств наноструктур, Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, г. Троицк;

Глушков Владимир Витальевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией низких температур Отдела низких температур и криогенной техники Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва.

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Защита диссертации состоится 15 декабря 2016 г. в 16.30 на заседании диссертационного совета Д 520.009.01 при Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу: 123182 Россия, Москва, пл. академика Курчатова, д. 1, Главное здание, конференц-зал (ауд. 231-236).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 520.009.01, к.ф.-м.н.



А.В. Мерзляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современная СВЧ-электроника опирается на НЕМТ (*high electron mobility transistor*), или транзистор с высокой подвижностью электронов. НЕМТ представляет собой полевой транзистор, проводящий канал которого создается гетеропереходом или квантовой ямой (КЯ). Материалы слоёв подбираются так, чтобы ширина запрещённой зоны материала барьерного слоя превосходила ширину запрещенной зоны канала. Например, широко используются гетеросистемы InAlAs (широкозонный, барьер) и InGaAs (узкозонный, КЯ) на подложках GaAs или InP. Таким образом, формируется КЯ, а в ней – двумерные носители заряда. На базе таких структур делаются сверхвысокочастотные транзисторы. Созданные на основе таких гетероструктур устройства нашли широкое применение в широкополосной спутниковой и мобильной связи, спутниковом и цифровом телевидении, системах безопасности, радиолокации, радиоастрономии, метеорологии, лазерной технике, медицинском оборудовании. СВЧ приборы на основе НЕМТ-структур обладают максимальными рабочими частотами при минимальном уровне шума.

Определяющей характеристикой полупроводниковых гетероструктур для большинства применений является подвижность носителей заряда в КЯ. Подвижность определяет, например, рабочую частоту транзистора или выходную мощность усилителя. Безусловно, для высокого значения подвижности носителей заряда необходимы определенные технологические приемы роста и легирования структур. Подвижность электронов в канале зависит и от многих свойств НЕМТ-структуры: зонной структуры материалов, дополнительного рассеяния носителей заряда на шероховатостях боковых стенок квантовой ямы и др. Однако работ, где комплексно бы изучались зонная структура и электрофизические параметры НЕМТ-структур в зависимости от уровня легирования, ширины квантовой ямы, наличия вставок в квантовую яму не так много. В частности, в литературе практически нет работ, где с помощью эффекта Шубникова-де-Гааза (ШдГ) были бы детально исследованы электронные подвижности в подзонах размерного квантования в НЕМТ-структурах с квантовой ямой InGaAs в зависимости от ширины квантовой ямы, наличия вставок InAs в яму, различного легирования, включая легирование

магнитной примесью. Любая модификация гетероструктур может привести к изменению эффективной массы носителей заряда, определение которой, в общем случае, является нетривиальной задачей, ввиду зависимости ее величины от номера подзоны размерного квантования. Последнее особенно важно для структур с большой концентрацией носителей заряда. Для увеличения подвижности электронов используют полупроводники с меньшей эффективной массой. Например, перспективно использование InGaAs с высоким содержанием InAs, поскольку эффективная масса в InAs существенно меньше, чем в GaAs. Однако увеличение содержания InAs приводит к увеличению параметра решетки, в результате чего такие структуры получаются напряженными. Одним из путей увеличения содержания InAs в канале является введение вставки InAs в изоморфную квантовую яму InGaAs. При этом оказывается необходимым экспериментальное определение эффективных масс электронов m^* , поскольку подобная модификация также приводит к увеличению рассеяния, уменьшающего подвижность. Большая часть методов определения m^* оказывается применима только в простейших случаях.

Отдельной задачей является уменьшение рассеяния электронов в структуре. На рассеяние электронов и изменение их подвижности оказывает влияние буфер и его конструкция.

Исследование особенностей электрофизических характеристик структур с магнитной примесью одна из актуальнейших задач. Однако, результаты исследований двумерных каналов с магнитной примесью, в частности, особенностей спин-поляризованного тока и его взаимодействия с локализованными магнитными моментами, опубликованы лишь в малом количестве работ.

Цель работы и научные задачи

Целью настоящей работы является установление закономерностей влияния на зонную структуру, транспорт, подвижности и эффективные массы двумерных носителей заряда в НЕМТ-структурах с КЯ InGaAs на подложках GaAs и InP различных модификаций, таких как: 1 - нановставки InAs различной толщины в центр квантовой ямы InGaAs, 2 - варьирование состава активной области, 3 - различная конструкция метаморфного буфера, 4 - различная кристаллографическая ориентация подложки, 5 - легирование магнитной примесью Mn для исследования

магнитных свойств и особенностей спин-поляризованного токопереноса в системе с пространственным разделением делокализованных носителей заряда и локальных магнитных моментов примеси, б - внесение беспорядка в КЯ в виде слоя квантовых точек.

Для достижения указанной цели в работе ставились следующие научные задачи:

1 - Исследование влияния содержания InAs в квантовой яме InGaAs на концентрации, подвижности и эффективные массы электронов в каждой подзоне размерного квантования при однородном и селективном профиле увеличения содержания InAs с помощью разделения частот в эффекте ШдГ.

2 - Исследование влияния различной конструкции метаморфного буфера и разориентации подложки на подвижности электронов, определяемых по эффекту ШдГ в каждой подзоне размерного квантования, и анизотропию подвижностей и сопротивлений в гетероструктурах с высоким содержанием InAs. Изучение природы анизотропии электронных подвижностей.

3 - Изучение особенностей магнетосопротивления и эффекта Холла в гетероструктурах с магнитной примесью Mn и различной глубиной квантовой ямы в широком интервале температур $2 < T < 300\text{K}$. Определение природы аномального эффекта Холла в таких структурах.

4 - Изучение магнитных свойств структур с однородной КЯ InGaAs и слоем квантовых точек, легированных марганцем. Определение роли дополнительного рассеяния в проводящем канале, вводимого слоем квантовых точек, в формировании свойств магнитных гетероструктур с различной амплитудой флуктуационного потенциала примеси в присутствии нескольких магнитных фаз.

Научная новизна

В данной работе впервые было проведено систематическое исследование влияния содержания InAs в квантовой яме InGaAs на подвижности и эффективные массы электронов, определенных с помощью эффекта ШдГ, в каждой подзоне размерного квантования при однородном и селективном профиле увеличения содержания InAs. Экспериментально показано, что увеличение содержания InAs приводит к уменьшению эффективных масс электронов в каждой подзоне

размерного квантования. Для определения эффективных масс исследовался эффект Шубникова - де Гааза при двух различных температурах. Было показано, что можно использовать как кратные, так и некратные температуры для определения указанных параметров гетероструктур. Наблюдаемые осцилляции ШдГ разделялись на монохроматические частоты, что позволило определять эффективные массы электронов и их подвижности в каждой подзоне размерного квантования отдельно.

На основании исследования осцилляций ШдГ и эффекта Холла в метаморфных гетероструктурах с высоким содержанием InAs выявлены оптимальные способы модификации структуры буфера, а также изменения свойств таких структур при использовании разориентированных подложек. Определена анизотропия транспортных свойств данных систем, которая может обуславливаться не только морфологией гетерограниц и профилем распределения дислокаций и решеточных напряжений, но и распределением примеси во время роста на вицинальной поверхности. Также показано, что изменение морфологии интерфейсов канала и поверхности структуры, обладающих поперечно-полосатым рельефом, не соответствует изменению электронных подвижностей, то есть рассеяние на шероховатостях гетерограниц вносит лишь частичный вклад в ограничение подвижностей электронов.

Впервые исследована природа аномального Холла в гетероструктурах с магнитной примесью марганца, пространственно отделенной от проводящего канала. Исследовано влияние топологии магнитной подсистемы на наблюдаемые явления, в частности в аномальном эффекте Холла в системе с дрейфовой проводимостью отмечено проявление вклада асимметричного рассеяния на критических флуктуациях. Показано, что взаимодействие с магнитным слоем обуславливает наблюдаемое низкотемпературное отрицательное магнетосопротивление. Впервые экспериментально обнаружено наличие топологического вклада в аномальном эффекте Холла в неупорядоченных двумерных системах. Таким образом, нетривиальная топология исследуемой магнитной подсистемы может оказаться свойством основного состояния, что качественно отличается от большинства исследованных ранее магнитных структур.

Впервые изучен ферромагнетизм в структурах с квантовой ямой InGaAs и слоем квантовых точек, легированных марганцем, с пространственным разделением магнитной примеси и проводящего канала. Показано, что дополнительное рассеяние в канале, вводимое слоем квантовых точек, не приводит к качественному изменению свойств магнитных гетероструктур. Это свидетельствует об определяющей роли флуктуационного потенциала магнитной примеси. При этом дырки в проводящем канале взаимодействуют в основном с изолированными моментами Mn в полупроводниковой матрице, о чем свидетельствует малость аномального эффекта Холла при высоких температурах.

Достоверность научных положений, результатов и выводов

Достоверность научных результатов обусловлена применением комплекса современных и общепризнанных взаимодополняющих экспериментальных методик исследования и подтверждается воспроизводимостью полученных результатов. Обработка экспериментальных данных проведена в соответствии с современными теоретическими представлениями. Полученные в работе результаты и выводы не противоречат ранее известным литературным данным и неоднократно апробированы на международных и российских конференциях, а также научных семинарах.

Основные положения, выносимые на защиту

1 - Изучено влияние содержания InAs в квантовой яме InGaAs на эффективные массы и подвижности электронов в каждой подзоне размерного квантования при однородном и селективном профиле увеличения содержания InAs. Осцилляции ШдГ, измеренные при двух температурах, были разделены на монохроматические частоты, что позволило определить эффективные массы электронов независимо в каждой подзоне размерного квантования. Экспериментально показано, что увеличение содержания InAs приводит к уменьшению эффективной массы в обеих подзонах. Обнаружено, что во всех исследованных образцах, эффективная масса во второй подзоне оказывается больше чем в первой, что связывается с непараболичностью закона дисперсии.

2 - Исследованы зависимости подвижности и концентрации электронов в квантовых ямах $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, δ -легированных Si, от

структуры метаморфного буфера, ориентации подложки и уровня легирования. Показано, что ступенчатый профиль метаморфного буфера по эффективности оптимизации подвижности электронов близок к линейному профилю с внедренным сбалансировано-рассогласованными сверхрешетками, что, скорее всего, связано с минимизацией остаточных напряжений и плотности прорастающих дислокаций. Использование разориентированных на $2 \pm 0.5^\circ$ подложек GaAs приводит к увеличению концентрации электронов в канале на 25%, ввиду лучшего встраивания в решетку примесных атомов на вицинальной поверхности. Это согласуется с изменением анизотропии электронных подвижностей в данных структурах, определенных по эффектам Холла и ШдГ. Увеличение уровня легирования приводит к пропорциональному росту концентрации электронов.

3 - Изучены особенности магнетотранспортных свойств гетероструктур с магнитной примесью в зависимости от содержания марганца и глубины квантовой ямы. Показано, что пространственное разделение канала и магнитного слоя сохраняет качественные особенности, присущие разбавленным магнитным полупроводникам.

4 - Экспериментально обнаружено наличие нескольких вкладов в аномальный эффект Холла в исследуемых образцах. В режиме прыжковой проводимости ниже 8К проявляется топологический вклад, обусловленный нетривиальной топологией магнитной подсистемы, образующейся за счет взаимодействия Дзялошинского - Мории, снимающего конфигурационное вырождение триад перколяционной сетки. В режиме дрейфовой проводимости в области перехода в состояние с дальним магнитным порядком наблюдается вклад асимметричного рассеяния на критических флуктуациях магнитной подсистемы. Предполагается, что выполаживание параметрической зависимости при температурах ниже 8К в этом случае также связано с проявлением топологического вклада.

5 - Установлено, что введение дополнительного беспорядка в квантовой яме слоем квантовых точек, образующих двумерный дырочный газ за счет перекрытия их волновых функций, качественно сохраняет магнитные свойства и особенности наблюдаемых магнетотранспортных явлений. При этом основную роль в проводимости системы играет флуктуационный потенциал магнитной примеси.

Спиновая поляризация дырок в канале, скорее всего, происходит за счет взаимодействия с изолированными моментами марганца в примесном слое.

Практическая значимость

Использованный метод разделения осцилляций ШдГ на несколько частот эффективен при исследовании систем с несколькими заполненными подзонами размерного квантования, либо содержащих несколько групп носителей заряда иной природы. Данные по метаморфным гетероструктурам с высоким содержанием InAs важны для создания сверхвысокочастотных транзисторов и монолитных интегральных микросхем с низким уровнем шума. Показанная эффективность ступенчатого профиля метаморфного буфера имеет значение для оптимизации процесса изготовления гетероструктур, поскольку использование метаморфного буфера с линейным профилем и внедренными сверхрешетками является более трудоемким. Полученные результаты исследования магнитных гетероструктур, с пространственным разделением проводящего канала и магнитного примесного слоя, имеют значение для понимания механизмов взаимодействия делокализованных носителей заряда и магнитных моментов примеси. Подобные структуры с высокими значениями подвижностей дырок важны для создания спинового транзистора. Кроме того, обнаруженная нетривиальная топология магнитной подсистемы в исследованных структурах важна для определения их основного состояния, которое потенциально может содержать скирмионы или аналогичные образования.

Личный вклад соискателя

Измерения эффекта Шубникова - де Гааза и гальваномагнитных свойств, представленные в диссертации, выполнены соискателем самостоятельно. Сбор и анализ литературных данных, идентификация механизмов проводимости, расчёты зонной структуры, определение эффективных масс, транспортных и квантовых подвижностей электронов по эффекту Шубникова - де Гааза, а также исследование аномального эффекта Холла и определение холловских параметров выполнены лично соискателем.

Апробация работы

Основные результаты данной работы были представлены на следующих конференциях и научных школах: 1) 5-ая и 7-ая Научно-практические конференции

по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2014, 2016); 2) Московский международный симпозиум по магнетизму (MISM-2014) (Москва, 2014); 3) 12-ая Курчатовская научная школа (Москва, 2014); 4) 27 международная конференция по физике низких температур (Аргентина, Буэнос Айрес, 2014); 5) 22 Международный симпозиум "Наноструктуры: физика и технология" (Санкт-Петербург, 2014); 6) Международная конференция "Spin physics, spin chemistry and spin technology" (Санкт-Петербург, 2015); 7) Международная конференция "XXXVII Совещания по физике низких температур" (Казань, 2015); 8) XII Российская конференция по физике полупроводников (Звенигород - Ершово, 2015); 9) 17 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2015); 10) XXI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург - Алапаевск, 2016); 11) Международная конференция "Transport in interacting disordered systems" (TIDS-16) (Испания, Гранада, 2016).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 25 печатных работах, в том числе 9 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, включённых в перечень ВАК, и 16 тезисов докладов на конференциях. Список опубликованных работ приведен в конце автореферата.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 145 наименований. Текст работы представлен на 136 страницах, включая 58 рисунков и 11 таблиц.

Содержание работы

Во *введении* обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы и научные задачи исследований, дан анализ научной новизны полученных результатов и их практической значимости. Описана структура диссертации, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и список публикаций по теме диссертации.

В *первой главе* содержится краткий обзор литературы по особенностям двумерных систем и влиянию различных структурных модификаций на зарядовый транспорт в них. Описываются основные свойства разбавленных магнитных полупроводников с примесью марганца, включая: механизмы обменного взаимодействия при различных конструкциях системы; флуктуационный потенциал, вызванный неоднородностью распределения атомов Mn, и особенности магнитной подсистемы в этом случае. Рассмотрены основные механизмы аномального эффекта Холла в системах с различным характером проводимости.

Одним из наиболее эффективных и распространенных способов изучения двумерных систем с высокой подвижностью носителей заряда является исследование эффекта ШдГ. С его помощью можно определять концентрации и подвижности носителей заряда. Кроме того, по отношению амплитуд осцилляций ШдГ, измеренных при температурах T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$), можно определить эффективную массу m^* носителей заряда согласно формуле

$$\frac{A(T_2)}{A(T_1)} = \frac{T_2}{T_1} \cdot \sinh\left(\frac{2\pi^2 k_B T_1}{\hbar \omega_c}\right) / \sinh\left(\frac{2\pi^2 k_B T_2}{\hbar \omega_c}\right), \quad (1)$$

где k_B - постоянная Больцмана, \hbar - приведенная постоянная Планка, $\omega_c = eB/m^*$.

Выражение (1) является трансцендентным уравнением относительно m^* . Однако, при условии $T_1 = 2T_2$, оно заметно упрощается и приобретает следующий вид:

$$m^* = \frac{e\hbar B_p}{2\pi^2 k_B T_2} \text{Arch}\left[\frac{A(T_2, B_p)}{A(T_1, B_p)}\right], \quad (2)$$

где B_p - магнитное поле, соответствующее экстремуму осцилляций. Таким образом, уравнение (2) аналитически решается в каждом экстремуме осцилляций, а итоговое значение m^* определяется усреднением полученных решений. Важно отметить, что для использования выражений (1) и (2) необходимо корректно определять амплитуды осцилляций, что становится невозможным при появлении биений, то есть при заполнении нескольких подзон размерного квантования.

Во многом свойства гетероструктуры с КЯ зависят от её морфологии. При этом, по соотношению параметров решетки выращиваемых слоев и подложки можно выделить три основных класса гетероструктур: изоморфные (решеточно-

согласованные), псевдоморфные (решеточно-рассогласованные), метаморфные (с плавно изменяемым составом).

Для получения высоких значений подвижности носителей заряда в канале, необходимо использовать материал с минимальной эффективной массой, что в случае КЯ InGaAs соответствует большему содержанию InAs. Однако, при увеличении содержания InAs меняется и параметр решетки. В результате в подобных структурах возникают решеточные напряжения и дислокации, увеличивающие рассеяние носителей заряда. Для сохранения высоких значений подвижности носителей заряда в КЯ с высоким содержанием InAs используют метаморфный буфер, в котором параметр решетки меняется от подложки к активному слою. Подобный подход оказывается значительно эффективнее псевдоморфного роста, однако, результирующие значения подвижности сильно зависят от выбранной структуры метаморфной гетерокомпозиции. Существенное влияние на различные свойства гетероструктур также оказывает использование разориентированных подложек.

Исследования полупроводниковых структур с магнитной примесью представляют большой интерес для спинтроники. Разбавленный магнитный полупроводник (РМП) (Ga,Mn)As является одной из наиболее изученных систем. Однако, получение больших значений подвижности носителей заряда предполагает пространственное разделение проводящей системы и магнитной примеси, то есть центров рассеяния. Подобный сценарий можно реализовать в гетероструктурах с КЯ, отделенной спейсерным слоем от магнитной примеси. Стоит учитывать, что при легировании атомы марганца сильно диффундируют, поэтому вместо резкого δ -слоя образуется примесный слой (Ga,Mn)As толщиной в несколько нанометров. При этом обменное взаимодействие между магнитными атомами Mn, являющихся акцепторами в позициях замещения галлия, может переноситься как остаточными носителями заряда в примесном слое, так носителями заряда в КЯ за счет туннелирования, которое может стать резонансным при определенном соотношении параметров системы. Неоднородное распределение атомов Mn в примесном слое, приводит к возникновению флуктуационного потенциала, влияющего на проводимость в КЯ, которая может стать прыжковой в случае низкой концентрации

носителей заряда. Неоднородное распределение Mn также приводит к образованию областей с локальным магнитным упорядочением, в результате чего при понижении температуры возникает перколяционный магнитный кластер, образованный взаимодействием таких областей друг с другом.

Одним из важнейших свидетельств наличия взаимодействия носителей заряда, участвующих в токопереносе, с магнитной подсистемой является возникновение аномального эффекта Холла (АЭХ), проявляющегося в виде нелинейной добавки к магнитополевой зависимости холловского сопротивления. Для систем с дрейфовым характером проводимости в литературе можно выделить три основных механизма возникновения АЭХ: *внутренний*, который обычно связывают с приобретением квазичастицами фазы Берри при движении в импульсном пространстве; *асимметричное рассеяние*, связанное с зависимостью направления движения рассеянной квазичастицы от ее спина (аналог рассеяния Мотта); *боковое смещение траектории* рассеянной квазичастицы. При переходе в режим прыжковой проводимости нормальный эффект Холла приобретает квантовую природу, поскольку возникает в результате интерференции амплитуд прыжков по различным траекториям. При этом, АЭХ может возникать ввиду различной вероятности прыжков по одной траектории квазичастиц с разным спином (*спин-зависимый транспорт*). Кроме того, дополнительный вклад в АЭХ может возникать при наличии нетривиальной топологии магнитной подсистемы, то есть при наличии скирмионов или аналогичных образований, возникающих за счет взаимодействия Дзялошинского-Мории (*топологический вклад*). Наиболее распространённым способом исследования АЭХ является анализ параметрической зависимости аномальной компоненты холловского сопротивления R_{xy}^a от сопротивления образца R_{xx} , который позволяет классифицировать различные вклады в АЭХ.

Во *второй главе* приведено описание измерительных установок, а также исследуемых образцов, содержащих КЯ InGaAs. Описаны структуры образцов с разными профилями увеличения содержания InAs: *однородным* (псевдоморфные структуры с различным составом активной области) и *селективным* (структуры с изоморфной КЯ и центральной нановставкой InAs). Приведено описание структур с

метаморфным буфером, выращенных на сингулярных и разориентированных подложках. Описаны структуры с различным составом КЯ и разным содержанием магнитной примеси Mn. А также описаны структуры с магнитной примесью, в которых вместо однородной КЯ был выращен слой квантовых точек InAs, в которых образуется двумерный дырочный газ.

Третья глава посвящена исследованию структур с различным профилем увеличения содержания InAs. Как уже упоминалось ранее, при заполнении нескольких подзон размерного квантования в осцилляциях ШдГ появляются биения. Поэтому в настоящей работе с помощью цифрового полосного фильтра осцилляции ШдГ (рис. 1а) разделялись на монохроматические частоты, что позволило анализировать осцилляции от первой подзоны (рис. 1б) и от второй (рис. 1с) отдельно.

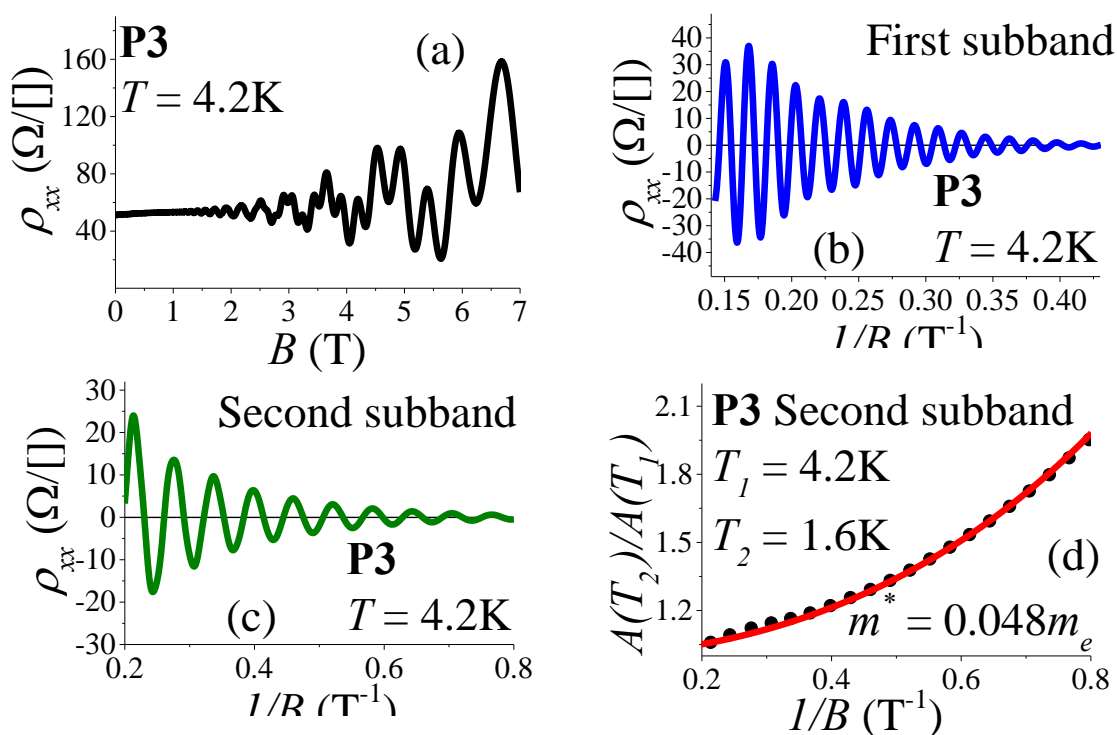


Рис. 1. Осцилляции ШдГ для псевдоморфного образца P3 с содержанием InAs в КЯ $x=0.61$: (а) – исходные, (б) – от первой подзоны, (с) – от второй подзоны; (d) - отношения амплитуд осцилляций, измеренных при двух температурах (точки), и их аппроксимация по формуле (1) (линия)

Таким образом, измерив осцилляции ШдГ при двух температурах, удалось определить эффективные массы электронов в каждой подзоне размерного квантования по отдельности. При этом, обрабатывались кривые, измеренные как при кратных температурах $T_1 = 2T_2$, так и при произвольном соотношении, то есть

производилась аппроксимация по формуле (1), пример приведен на рис. 1d. Кроме того были определены подвижности электронов в исследуемых структурах с помощью следующих методов: из эффекта Холла, из аппроксимации осцилляций ШдГ теоретической кривой и построением графиков Дингла. Используя полученные значения эффективных масс удалось оценить влияние разных профилей увеличения содержания InAs на рассеяние электронов в исследуемых структурах. В результате, было продемонстрировано что увеличение содержания InAs приводит к уменьшению эффективных масс электронов в обеих подзонах размерного квантования, однако, их рассеяние, а значит и итоговая величина подвижности, сильно зависит от профиля увеличения.

В *четвертой главе* приведены результаты исследования метаморфных гетероструктур, выращенных на сингулярных и разориентированных подложках, с разным уровнем легирования. В работе производилось сравнение транспортных параметров структур с различной конструкцией метаморфного буфера – ступенчатого буфера и линейного буфера с внедрёнными сверхрешетками. Образцы были изготовлены в виде двух скрещенных холловских мостиков, измерения сопротивления и определение подвижностей электронов производились в двух ортогональных кристаллографических направлениях R и L. В эксперименте наблюдается существенная анизотропия сопротивлений (рис. 2а) и подвижностей

электронов в исследуемых структурах. Подвижности электронов определялись из эффектов Холла и ШдГ. Отчетливым свидетельством анизотропии электронных подвижностей является существенно разный вид осцилляций ШдГ, измеренных в двух направлениях (рис. 2b), поскольку форма осцилляций магнетосопротивления

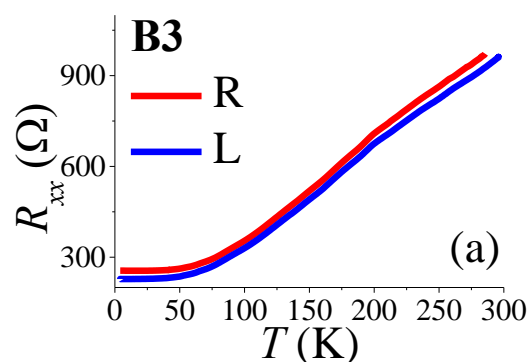


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления (а) и осцилляции ШдГ (b) для образца В3 со ступенчатым буфером, измеренные в двух ортогональных кристаллографических направлениях

определяется как концентрациями носителей заряда, так и их подвижностью. При этом, максимальные подвижности электронов во всех образцах соответствуют направлению L (кристаллографическая ось $[01\bar{1}]$).

Из сравнения полученных значений электронных концентраций и подвижностей в исследуемых структурах были выявлены основные тенденции, привносимые исследуемыми модификациями. Так, подвижности электронов в структурах с различными конструкциями метаморфного буфера оказались близки, что свидетельствует об одинаковой эффективности в минимизации плотности образующихся дислокаций и величины остаточного напряжения. При этом, тенденции изменения анизотропии подвижности от образца к образцу указывают на то, что наблюдаемая анизотропия определяется не только анизотропией релаксации решеточных напряжений и появлением ступенек на поверхности растущих слоев при использовании разориентированных подложек (визинальные подложки), но и возможной анизотропией латерального распространения дислокаций и особенностями пространственного распределения легирующей примеси кремния.

Пятая глава посвящена исследованию гетроструктур с однородной КЯ InGaAs или слоем квантовых точек (КТ) InAs, легированных магнитной примесью Mn. На примере структур с малым содержанием марганца (до 0.5 монослоя) и различным характером проводимости в канале выявлены основные особенности магнетотранспорта в исследуемом классе систем. Для всех исследуемых образцов наблюдается особенность (пик или «плечо») на температурной зависимости сопротивления (рис. 3а), связанная с образованием магнитного перколяционного кластера. Кроме того, обнаружена смена знака магнетосопротивления при понижении температуры (рис. 3б), при этом низкотемпературное отрицательное магнетосопротивление связывается с подавлением спин-зависимого рассеяния или аналогом эффекта туннельного магнетосопротивления. Для некоторых образцов также наблюдаются отчетливые осцилляции ШдГ. В исследуемых образцах наблюдается АЭХ, для которого были получены температурные и магнитополевые зависимости. Совокупность наблюдаемых явлений (особенность на $R_{xx}(T)$, отрицательное магнетосопротивление и АЭХ) свидетельствует о наличии

взаимодействия между проводящей и магнитной подсистемами в исследуемых образцах, аналогично случаю обычного разбавленного магнитного полупроводника (Ga,Mn)As. Таким образом, показано, что пространственное разделение магнитного слоя и КЯ сохраняет качественные особенности, присущие разбавленным магнитным полупроводникам.

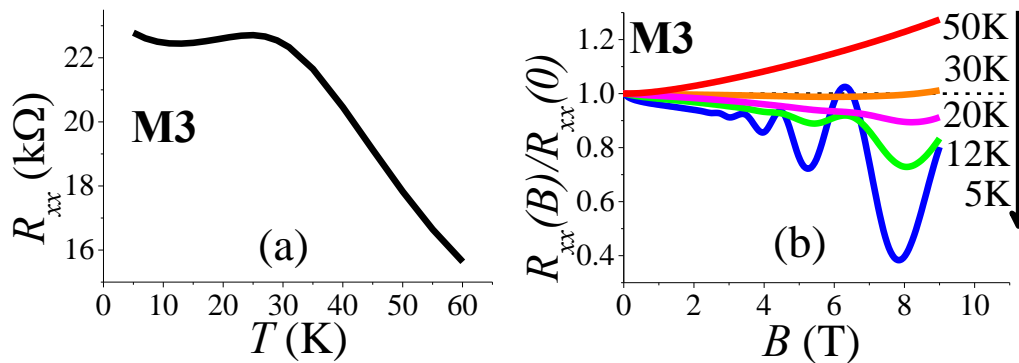


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления (a) и магнетосопротивление при различных температурах (b) для образца М3 с содержанием Mn 0.5 монослоя

АЭХ в исследуемых структурах имеет немонотонный характер и становится отрицательным, относительно знака нормального эффекта Холла, при понижении температуры. Анализ параметрической зависимости $R_{xy}^a(R_{xx})$ выявил наличие вкладов от нескольких механизмов возникновения АЭХ. Так, например, для образца с содержанием марганца 0.3 монослоя (рис. 4) в области активационной проводимости (участок I) доминантную роль играет внутренний механизм и/или боковое смещение. При переходе в режим прыжковой проводимости АЭХ обуславливается механизмом спин-зависимого транспорта (участок II), вклад от которого имеет более плавную зависимость ниже критической температуры образования магнитного перколяционного кластера (участки III и IV). Рассмотрение участка IV при меньших магнитных полях

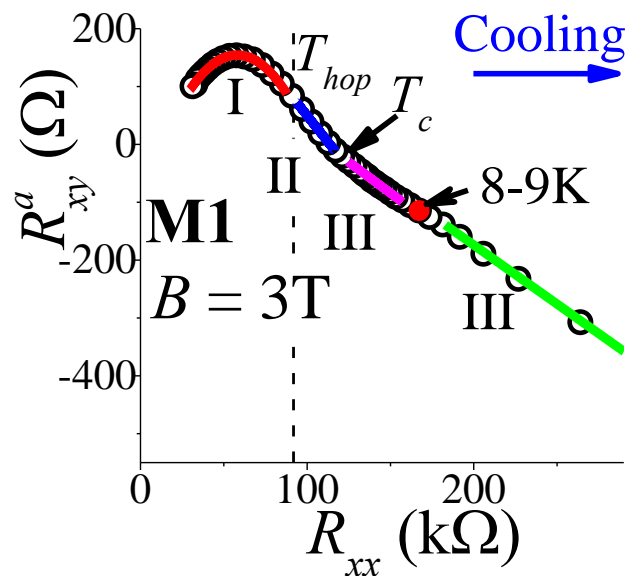


Рис. 4. Параметрическая зависимость АЭХ в поле 3Тл для образца М1 с содержанием Mn 0.3 монослоя

свидетельствует о наличии дополнительного вклада в этой области температур. Поскольку этот вклад исчезает в больших полях, что характерно для топологического вклада в АЭХ, проведенный анализ указывает на образование нетривиальной топологии магнитной подсистемы при температурах ниже 8К. Аналогичный анализ параметрических зависимостей был проведен и для образцов с дрейфовой проводимостью. В этом случае на параметрической зависимости $R_{xy}^a(R_{xx})$ можно выделить две области: критическую (вблизи температуры образования магнитного перколяционного кластера), в которой проявляется линейный вклад, скорее всего, связанный с асимметричным рассеянием дырок на критических флуктуациях магнитной подсистемы; и некритическую, в которой параметрическая кривая имеет квадратичный скейлинг, аналогично участку I, показанного на рис. 4, что связывается с доминантной ролью внутреннего механизма и/или бокового смещения. Также стоит отметить, что при температурах ниже 8К для образца с дрейфовым характером проводимости в области слабых магнитных полей наблюдается выхолаживание параметрической кривой, которое также может быть связано с проявлением топологического вклада в АЭХ.

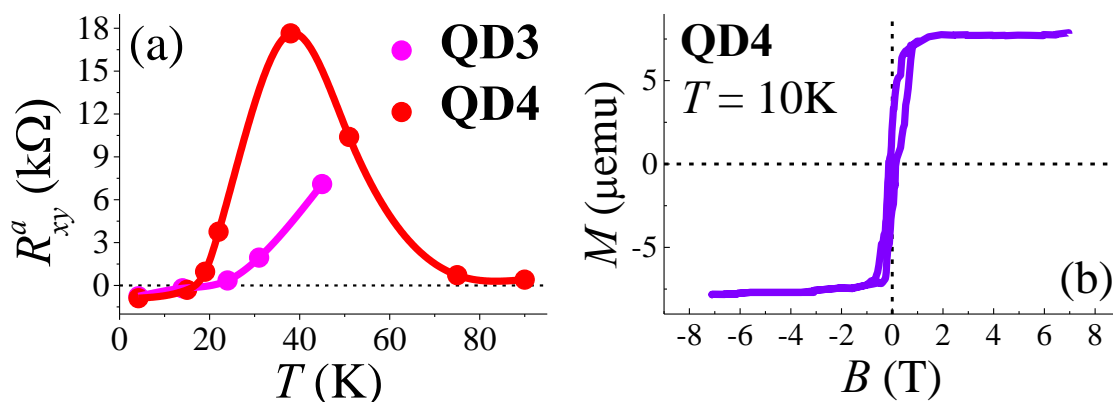


Рис. 5. Температурные зависимости АЭХ (а) и магнитнополевые зависимости магнитного момента (b) для образцов QD3 и QD4 со слоем КТ

Образцы со слоем КТ InAs демонстрируют те же особенности магнетотранспорта, что и образцы с однородной КЯ, включая смену знака магнетосопротивления и особенности АЭХ (рис. 5а). Кроме того, в магнитометрических исследованиях образцы с КЯ или слоем КТ с большим содержанием марганца демонстрируют отчетливый гистерезис, связанный с образованием нанокластеров MnAs (рис. 5b).

Основные результаты и выводы

1. Изучено влияние содержания InAs в квантовой яме InGaAs на подвижности и эффективные массы электронов в каждой подзоне размерного квантования при однородном и селективном профиле его увеличения. Разделение осцилляций Шубникова – де Гааза на монохроматические частоты позволило определить квантовые подвижности и эффективные массы электронов независимо в каждой подзоне размерного квантования. Для определения эффективных масс использовались амплитуды осцилляций, измеренные при двух температурах, либо отличавшихся в два раза, либо с произвольным соотношением. Установлено, что во всех исследованных образцах, эффективная масса во второй подзоне размерного квантования оказывается больше чем в первой, что связывается с непараболичностью энергетического спектра. Показано, что увеличение содержания InAs в канале уменьшает эффективные массы в обеих подзонах. Отмечено существенное влияние профиля увеличения InAs на рассеяние электронов в системе. Также была получена большая плотность электронов в двусторонне δ -легированной структуре при сохранении высоких значений подвижности электронов.

2. Исследованы зависимости подвижности и ее анизотропии и концентрации электронов, определенных из эффектов Холла и Шубникова – де Гааза, в квантовых ямах $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, δ -легированных Si, от структуры метаморфного буфера, ориентации подложки и уровня легирования. Показано, что использование ступенчатого профиля метаморфного буфера приводит к высоким значениям электронных подвижностей, близких к значениям подвижностей в структуре с линейным профилем и внедренным сбалансировано-рассогласованными сверхрешетками. Использование разориентированных на $2 \pm 0.5^\circ$ подложек GaAs приводит к увеличению концентрации электронов в канале на 25%, ввиду лучшего встраивания примесных атомов на вицинальной поверхности, и уменьшению электронной подвижности, что частично связано с особенностями распределения примеси на вицинальной поверхности. Это согласуется с изменением анизотропии электронных подвижностей в данных структурах. Увеличение уровня легирования приводит к пропорциональному росту концентрации электронов, что указывает на отсутствие дополнительной самокомпенсации в данной области легирования.

3. Изучены особенности магнетотранспортных свойств гетероструктур, легированных магнитной примесью Mn, в зависимости от содержания марганца и глубины квантовой ямы. Показано, что пространственное разделение канала и магнитного слоя сохраняет качественные особенности, присущие разбавленным магнитным полупроводниковым системам, то есть, сохраняет взаимодействие носителей заряда в яме с магнитными моментами в примесном слое.

4. Экспериментально обнаружено наличие нескольких вкладов в аномальный эффект Холла в исследуемых образцах. В режиме прыжковой проводимости ниже 8 К проявляется топологический вклад, обусловленный нетривиальной топологией магнитной подсистемы, образующейся за счет взаимодействия Дзялошинского – Мории, снимающего конфигурационное вырождение триад перколяционной сетки. В режиме дрейфовой проводимости в области перехода в состояние с дальним магнитным порядком наблюдается вклад асимметричного рассеяния на критических флуктуациях магнитной подсистемы. Предполагается, что выполаживание параметрической зависимости при температурах ниже 8 К в этом случае также связано с проявлением топологического вклада. При этом, независимо от типа проводимости аномальный эффект Холла в данных структурах обладает характерными особенностями такими, как наличие немонотонной температурной зависимости, а также смены знака в области низких температур.

5. Установлено, что введение дополнительного беспорядка в канал посредством замены квантовой ямы на слой квантовых точек, образующих двумерный дырочный газ за счет перекрытия их волновых функций, качественно сохраняет особенности наблюдаемых магнетотранспортных явлений, включая особенности магнетосопротивления и аномального эффекта Холла. При этом основную роль в проводимости системы играет флуктуационный потенциал магнитной примеси. Спиновая поляризация дырок в канале, скорее всего, происходит за счет взаимодействия с изолированными моментами марганца в примесном слое.

Список публикаций по теме диссертации

1. V.A. Kulbachinskii, P.V. Gurin, L.N. Oveshnikov. Anomalous hole transport and ferromagnetism in doped with Mn GaAs/InGaAs/GaAs quantum well or

- GaAs/InAs/GaAs quantum dot layer // *Nanoscience and Nanotechnology Letters*. – 2012. – Vol. 4. – P. 634-640.
2. Л.Н. Овешников, В.А. Кульбачинский, А.Б. Давыдов, Б.А. Аронзон. Аномальный эффект Холла в 2D-гетероструктуре: квантовая яма GaAs/InGaAs/GaAs с отдаленным δ -слоем Mn // *Письма в ЖЭТФ*. – 2014. – Т. 100, вып. 9. – С. 648-653.
 3. В.А. Кульбачинский, Л.Н. Овешников, Р.А. Лунин, Н.А. Юзеева, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, П.П. Мальцев. Экспериментальное определение эффективных масс и подвижностей электронов в каждой из подзон размерного квантования в квантовой яме $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ со вставками InAs // *ФТП*. – 2015. – Т. 49, вып. 2. – С. 204-213.
 4. В.А. Кульбачинский, Л.Н. Овешников, Р.А. Лунин, Н.А. Юзеева, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, С.С. Пушкарев, П.П. Мальцев. Влияние конструкции буфера и ориентации подложки на подвижности электронов в метаморфных структурах $\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}/\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}/\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}$ на подложках GaAs // *ФТП*. – 2015. – Т. 49, вып. 7. – С. 942-950.
 5. V.A. Kulbachinskii, L.N. Oveshnikov, B.A. Aronzon. Ferromagnetism in GaAs/InAs/GaAs quantum dot layer delta-doped with Mn // *Solid State Phenomena*. – 2015. – Vol. 233/234. – P. 93-96.
 6. L.N. Oveshnikov, V.A. Kulbachinskii, A.B. Davydov, B.A. Aronzon. Anomalous Hall effect in 2D DMS // *Solid State Phenomena*. – 2015. – Vol. 233/234. – P. 109-112.
 7. N.A. Yuzeeva, G.B. Galiev, E.A. Klimov, L.N. Oveshnikov, R.A. Lunin, V.A. Kulbachinskii. Experimental determination of the subband electron effective mass in InGaAs/InAlAs HEMT-structures by the Shubnikov – de Haas effect at two temperatures // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 72. – P. 425-430.
 8. L.N. Oveshnikov, V.A. Kulbachinskii, A.B. Davydov, B.A. Aronzon, I.V. Rozhansky, N.S. Averkiev, K.I. Kugel, V. Tripathi. Berry phase mechanism of the anomalous Hall effect in a disordered two-dimensional magnetic semiconductor structure // *Nature Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – P. 17158. [doi: 10.1038/srep17158]
 9. N.A. Yuzeeva, A.V. Sorokoumova, R.A. Lunin, L.N. Oveshnikov, G.B. Galiev, E.A. Klimov, D.V. Lavruchin, V.A. Kulbachinskii. Electron mobilities and effective masses

- in InGaAs/InAlAs HEMT structures with high In content // Journal of Low Temperature Physics. – 2016. – P. 1-6. [doi: 10.1007/s10909-016-1589-6]
10. Л.Н. Овешников, В.А. Кульбачинский, Р.А. Лунин, Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, Е.А. Климов, Н.А. Юзеева. Влияние дизайна метаморфного буфера и ориентации подложки на транспортные свойства НЕМТ-структур $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ на подложках GaAs // 5-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 21-22 мая, 2014 г.): тезисы докладов. – С. 52-53.
 11. V.A. Kulbachinskii, L.N. Oveshnikov, R.A. Lunin, N.A. Yuzeeva, G.D. Losev, G.B. Galiev, E.A. Klimov, P.P. Maltsev. Experimental determination of the subband effective mass and the electron mobility in the isomorphic InGaAs quantum well with InAs inserts on InP substrate // 22nd International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology (Saint-Petersburg, June 23-27, 2014): proceedings. – P. 39-40.
 12. V.A. Kulbachinskii, L.N. Oveshnikov. Ferromagnetism in GaAs/InAs/GaAs quantum dot layer delta-doped with Mn // Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, June 29 - July 3, 2014): book of abstracts. – P. 210.
 13. L.N. Oveshnikov, V.A. Kulbachinskii, A.B. Davydov, B.A. Aronzon. Anomalous Hall Effect in 2D DMS // Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, June 29 - July 3, 2014): book of abstracts. – P. 514.
 14. V.A. Kulbachinskii, L.N. Oveshnikov, R.A. Lunin, N.A. Yuzeeva, G.B. Galiev, E.A. Klimov. Shubnikov – de Haas effect and electron mobilities in the isomorphic InGaAs quantum well with InAs inserts on the InP substrate // 27th International Conference on Low Temperature Physics (Argentina, Buenos Aires, August 6-13. 2014): abstracts book. – P. 38.
 15. Л.Н. Овешников, Н.А. Юзеева, Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, Р.А. Лунин, В.А. Кульбачинский. Особенности транспорта в метаморфных НЕМТ-структурах на подложках GaAs // XII Курчатовская молодежная научная школа (Москва, 28-31 октября, 2014 г.): сборник аннотаций. – С. 79.
 16. Л.Н. Овешников, В.А. Кульбачинский, Б.А. Аронзон. Особенности аномального эффекта Холла в РМП-гетероструктурах на подложке GaAs // XII Курчатовская

- молодежная научная школа (Москва, 28-31 октября, 2014 г.): сборник аннотаций. – С. 80.
17. Н.А. Юзеева, А.В. Сорокоумова, Р.А. Лунин, Л.Н. Овешников, Е.А. Климов, Г.Б. Галиев, В.А. Кульбачинский. Определение эффективных масс электронов по эффекту Шубникова – де Гааза в НЕМТ-структурах с квантовой ямой InGaAs с разным содержанием In // XII Курчатовская молодежная научная школа (Москва, 28-31 октября, 2014 г.): сборник аннотаций. – С. 87.
18. L.N. Oveshnikov, V.A. Kulbachinskii, B.A. Aronzon, A.V. Davydov, E.I. Yakovleva. Anomalous Hall effect in QW with hopping regime of conductivity // Spin physics, spin chemistry and spin technology (Saint Petersburg, June 1-5, 2015): proceedings. – P. 132.
19. Н.А. Юзеева, А.В. Сорокоумова, Р.А. Лунин, Л.Н. Овешников, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.А. Кульбачинский. Подвижности и эффективные массы электронов в НЕМТ –структурах InGaAs/InAlAs с повышенным содержанием In // Международная конференция «XXXVII Совещания по физике низких температур» (Казань, 29 июня - 3 июля, 2015 г.): программа и тезисы докладов. – С. 219 – 220.
20. Н.С. Аверкиев, Б.А. Аронзон, А.Б. Давыдов, И.В. Крайнов, В.А. Кульбачинский, Л.Н. Овешников, И.В. Рожанский, Е.И. Яковлева. Ферромагнетизм и аномальный эффект Холла в 2D структуре GaAs/InGaAs/GaAs с отдаленным дельта слоем Mn // XII Российская конференция по физике полупроводников (Ершово, 21-25 сентября, 2015 г.): тезисы докладов. – С. 99.
21. Л.Н. Овешников, В.А. Кульбачинский, Р.А. Лунин, Н.А. Юзеева, Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев. Влияние структуры метаморфного буфера и ориентации подложки на подвижности электронов в двумерном канале // XII Российская конференция по физике полупроводников (Ершово, 21-25 сентября, 2015 г.): тезисы докладов. – С. 262.
22. Л.Н. Овешников, В.А. Кульбачинский, Е.И. Нехаева, Б.А. Аронзон. Эффекты обменного взаимодействия в транспортных свойствах магнитных гетероструктур // 17 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и

- наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 23-27 ноября, 2015 г.): тезисы докладов. – С. 54.
23. Л.Н. Овешников, В.А. Кульбачинский, Е.И. Нехаева, Б.А. Аронзон. Аномальный эффект Холла в квантовых ямах GaAs/InGaAs/GaAs, с пространственно отделенным дельта-слоем марганца // XXI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург - Алапаевск, 15-20 февраля, 2016 г.): тезисы докладов. – С.157-158.
24. Л.Н. Овешников, Е.И. Нехаева, Б.А. Аронзон, В.А. Кульбачинский. Влияние топологии магнитной подсистемы на транспортные свойства гетероструктур с дельта-слоем Mn // 7-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 25 мая, 2016 г.): сборник трудов. – С. 27-28.
25. L.N. Oveshnikov, B.A. Aronzon, I.V. Rozhansky, N.S. Averkiev, V. Tripathi. Hopping anomalous Hall effect in 2D disordered magnetic semiconductors. Berry phase mechanism. // Transport in interacting disordered systems (TIDS-16) (Spain, Granada, August 21-25, 2016): book of abstracts. – P. 22. [<http://www.um.es/bohr/files/moo/bookabstracts.pdf>]