

официального оппонента на диссертацию Кокурина Ивана Александровича «Эффекты спин-орбитального взаимодействия в ультратонких полупроводниковых наноструктурах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07. - физика конденсированного состояния.

#### **Актуальность избранной темы.**

Диссертационная работа И. В. Кокурина посвящена теоретическому исследованию способов управления спином электронов в различных низкоразмерных полупроводниковых системах. Возможность воздействовать на спин с помощью света и тока дает спин-орбитальное взаимодействие. Фундаментальное по своей природе, то есть существующее в большей или меньшей степени в любых материалах, оно осуществляет связь между поступательным движением квазичастиц и вращением их спинов. На базе этих идей в физике конденсированного состояния возникло новое направление, активно развивающееся в последние два десятилетия – спиновая электроника (спинтроника).

Для создания новых приборов и устройств, работающих на основе спиновых степеней свободы, удобно использовать полупроводниковые материалы, являющиеся основой современной твердотельной электроники. Именно в полупроводниках были теоретически открыты и экспериментально исследованы ориентация спинов светом (оптическая ориентация) и электрическим током. Базой полупроводниковой спинтроники являются низкоразмерные структуры – квантовые ямы, нити и точки. Эти объекты можно получать с заранее заданными свойствами, что позволяет управлять орбитальными и спиновыми степенями свободы носителей заряда. В отличие от объёмных полупроводников, в квантовых ямах, освещаемых светом круговой поляризации, в низкоразмерных структурах фотоэлектроны рождаются полностью поляризованными по спину, а времена спиновой релаксации могут меняться в широких пределах в зависимости от свойств образца, внешнего электрического поля и температуры. Таким образом, тема диссертационной работы И. В. Кокурина, в которой исследуются оптическая ориентация носителей заряда в квантовых ямах GaAs/AlGaAs с магнитными примесями, транспортные свойства нанопроволок InAs, а также токовая ориентация спинов в квазиодномерных структурах, является актуальной.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяется использованием в качестве теоретической и методологической базы исследований апробированных при исследовании эффектов, связанных со спин-орбитальным взаимодействием в полупроводниковых структурах, научных подходов. И.А. Кокуриным подробно проанализированы результаты предыдущих исследований в области оптической и токовой спиновой ориентации в квантовых ямах в квантовых ямах и точках. Список цитируемой литературы составляет 99 ссылок. Основные научные положения, выносимые на защиту, достаточно полно обоснованы полученными

Кокуриным И.А. результатами, из которых наиболее интересными и важными, на мой взгляд, являются следующие:

1. Развита теория оптической ориентации спинов электронов в зоне проводимости и локализованных дырок при фотонейтрализации ионов марганца (магнитной примеси) в квантовых ямах GaAs/AlGaAs. Изучена спиновая и энергетическая релаксация фотовозбуждённых носителей.
2. Исследованы транспортные и спектральные свойства двумерных электронов на поверхности InAs нанопроволок. В работе получен гамилтониан спин-орбитального взаимодействия Дрессельхауза для электронов на цилиндрической поверхности, ориентированной в направлении [111]. Выполнены расчёты баллистического контактанса и дифференциального коэффициента термоэдс в InAs нанопроволоках с учётом спин-орбитальных взаимодействий Рашбы и Дрессельхауза.
3. Развита теория спиновой ориентации электронов в квазидвумерных структурах с несколькими заполненными подзонами размерного квантования.

Результаты диссертационной работы хорошо согласуются с данными предыдущих теоретических исследований в этой области в тех случаях, когда такое сопоставление возможно. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы в дальнейших теоретических и экспериментальных работах, проводимых в ФИАН им. Лебедева, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИФТГ РАН и других организациях, связанных с исследованием низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур.

#### **Достоверность и новизна научных положений и результатов.**

Достоверность результатов и положений, выносимых на защиту, определяется применением широко известных и хорошо апробированных методов теоретической физики. В 1-й главе использованы применяемые в оптике полупроводников методы матрицы плотности и вторичного квантования. Для описания примесных центров использованы модели потенциалов нулевого радиуса. При построении однозонного гамилтониана спин-орбитального взаимодействия во 2-й главе применяется метод инвариантов, а последующее решение спектральной задачи основано на численной диагонализации с использованием схемы с унитарными преобразованиями. Исследования, проведённые в 3-й главе диссертации, опираются на итерационную процедуру приближённого решения системы кинетических уравнений по малости электрического поля и спин-орбитального взаимодействия. Кроме этого, на достоверность, полученных результатов указывает их согласие, в предельных случаях, с результатами предыдущих теоретических исследований.

Положения, выносимые на защиту, и результаты, полученные в работе, формулируются впервые, что и определяет их новизну.

### Замечания по диссертационной работе.

Вместе с тем, необходимо отметить ряд недостатков, имеющих место в диссертационной работе:

- 1) В 1-й главе отсутствует обсуждение влияния обменного взаимодействия между магнитной примесью и дырками (фотовозбуждёнными электронами) на состояния вблизи потолка валентной зоны (зоны проводимости). Вместе с тем, известно, что такое взаимодействие в узкозонных КЯ приводит к дополнительному спиновому расщеплению в зоне проводимости и валентных зонах, порой сравнимых со спиновым расщеплением Рашбы и Дрессельхауза. Оценки, показывающие, почему этими спиновыми расщеплениями в КЯ GaAs/AlGaAs, в диссертационной работе не представлены.
- 2) В качестве основного механизма спиновой релаксации электронов в 1-й главе рассматривается механизм Дьяконова-Переля. Однако в работе не приводится обсуждения вкладов от механизмов, обусловленных обменным взаимодействием с ионами марганца. Было бы полезно в явном виде указать условия, при которых ими можно было пренебречь
- 3) Во 2-й главе объектами исследований являются InAs-нанопроволоки. Вместе с тем, известно, что InAs – узкозонный материал, и структуры на его основе характеризуются сильной непараболичностью закона дисперсии или, что тоже самое, выраженной зависимостью массы,  $g$ -фактора, констант спинового расщепления Рашбы и Дрессельхауза энергии. В модели, используемой в диссертационной работе, эта зависимость игнорируется.
- 4) Во 2-й главе при описании двумерного электронного газа на цилиндрической поверхности InAs-нанопроволоки учитывается только линейное по волновому вектору слагаемое спин-орбитального взаимодействия Дрессельхауза, кубичным слагаемым, при этом, пренебрегается. Недавние эксперименты, выполненные на квантовых ямах InGaAs/InAlAs и GaAs/AlGaAs [Nature (London) 458, 610 (2009), Phys. Rev. B 86, 081306 (2012), Phys. Rev. B 86,195 309 (2012)], свидетельствуют о значительной роли кубического слагаемого Дрессельхауза даже при низких значениях концентрации электронного газа. Качественного обсуждения влияния кубичного слагаемого баллистического контактанса и дифференциального коэффициента термоэдс в работе не проводится.
- 5). В 3-й главе развитая теория спиновой ориентации электронов в квазиодномерных структурах дополняется численными оценками спиновой поляризации, которые носят чрезвычайно общий характер. На мой взгляд, результаты расчётов, выполненные для конкретных механизмов межподзонного рассеяния и геометрии образцов, позволили бы продемонстрировать применение развитой теории в более выгодной форме.

Указанные замечания не снижают высокой оценки диссертации Кокурина И.А., а могут лишь служить советом по улучшению стиля подачи полученных результатов. В целом, диссертационная работа Кокурина И.А. производит положительное впечатление, и является самостоятельным и завершённым исследованием, выполненным на современном уровне. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертационная работа Кокурина И.А., в которой решен ряд задач, имеющих значение для развития физики конденсированного состояния, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07.

Научный сотрудник отдела  
физики полупроводников  
Института физики микроструктур  
Российской академии наук (ИФМ РАН)

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
Телефон: +7 (831) 417-94-82 (доб. 261)  
Факс: (831) 417-94-64,  
[sergey.krishtopenko@mail.ru](mailto:sergey.krishtopenko@mail.ru)

Криштопенко Сергей Сергеевич  
к.ф.-м.н.

Дата 15.09.2015

Подпись Криштопенко С.С. заверяю,

Учёный секретарь ИФМ РАН

к.ф.-м.н.

Д.А. Рыжов

