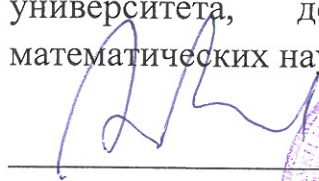
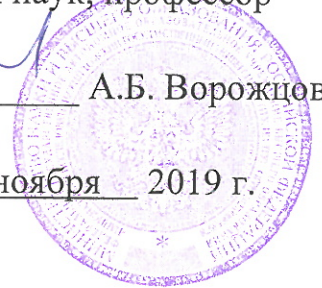


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной деятельности
Национального исследовательского
Томского государственного
университета, доктор физико-
математических наук, профессор


А.Б. Ворожцов

«21» ноября 2019 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на диссертационную работу Васильченко Александра Анатольевича «Теоретическое исследование коллективных явлений в электронных и электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Васильченко А. А. посвящена изучению влияния взаимодействия носителей заряда на свойства квантовых точек, квантовых ям и квантовых проволок. Актуальность темы диссертации для физики конденсированного состояния обусловлена тем, что объектами исследования являются низкоразмерные структуры, в которых в течение последних десятилетий открыты такие явления как целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла, высокотемпературная сверхпроводимость, переход металл-диэлектрик, квантование проводимости, спиновые капли и др. Для всех этих эффектов важную роль играет электрон-электронное взаимодействие. В низкоразмерных системах с малым числом электронов для изучения электронной структуры используется численное решение многочастичного уравнения Шредингера. Однако, этот метод требует больших вычислительных затрат и, в настоящее, время применим к системам с небольшим числом электронов. В представленной

диссертационной работе для описания систем взаимодействующих частиц используется теория функционала плотности.

Несмотря на то, что уже более 50 лет модель электронно-дырочной жидкости успешно применяется при исследовании полупроводниковых структур лишь недавно такие состояния носителей заряда были обнаружены в структурах с квантовыми ямами и квантовыми нитями. Несомненно, значительный фундаментальный и практический интерес представляет проблема поиска параметров низкоразмерных структур, в которых электронно-дырочная жидкость может образовываться при комнатной температуре. Тема диссертации Васильченко А. А. посвящена решению этой проблемы и поэтому является весьма актуальной.

Общая характеристика структуры содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и списка использованных источников, включающего 166 наименований. Работа представлена на 191 странице, включая 90 рисунков и 2 таблицы.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная и практическая значимость работы, сформулированы положения и основные результаты, выносимые на защиту, предоставлена информация об апробации работы, о публикациях и личном вкладе автора, а также приведена структура и краткое содержание диссертации.

В **первой главе** изложены основные элементы теории функционала плотности и приведен краткий обзор экспериментальных и теоретических работ по теме диссертации.

Во **второй главе** исследуются свойства электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) в квантовых ямах. Для вычисления энергии и равновесной плотности квазидвумерной ЭДЖ используется теория функционала плотности. Уравнения Шредингера для носителей заряда в квантовых ямах решаются как численно, так и приближенно аналитически. Получено аналитическое представление для энергии двухкомпонентной и трехкомпонентной ЭДЖ. Показано, что в отличие от трехмерной ЭДЖ, в квазидвумерном случае анизотропия масс носителей заряда может увеличивать энергию связи электрона и дырки.

На основе численных расчетов проведено исследование ЭДЖ в квантовых ямах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Расчеты показали, что электроны локализуются в слое SiGe , несмотря на наличие в этом слое потенциального барьера. Вычисления проведены для различных толщин квантовых ям и разных концентраций германия. Показано, что при низкой концентрации германия образуется трехкомпонентная ЭДЖ. С увеличением содержания

германия происходит переход к двухкомпонентной ЭДЖ, причем равновесная плотность электронно-дырочных пар сильно уменьшается. Представленные результаты исследования ЭДЖ в квантовых ямах Si/SiGe/Si хорошо согласуются с приведенными экспериментальными данными.

Приведены результаты исследований свойств ЭДЖ в электрическом и магнитном полях. Электрическое поле разрушает ЭДЖ. В магнитном поле возникают осцилляции равновесной плотности, связанные с изменением заселенностей уровней Ландау, а плотность электронно-дырочных пар значительно увеличивается по сравнению с нулевым магнитным полем.

Численными и аналитическими методами изучены свойства ЭДЖ в пленках алмаза с толщиной в несколько нанометров. Найдены условия образования ЭДЖ с наибольшей энергией связи и максимальной плотностью ЭДЖ. На основании полученных результатов осуществлена оценка критической температуры ЭДЖ, которая оказалась близкой к комнатной.

В третьей главе приведены результаты исследований электронной структуры двумерных квантовых точек в сильном магнитном поле в рамках теории функционала плотности. Проведены вычисления для квантовых точек с разным количеством электронов и разной напряженностью удерживающего потенциала и найдены новые серии «магических чисел» для полного углового момента электронов.

Вычислена величина незатухающего тока в квантовом кольце в зависимости от магнитного поля и получена эмпирическая формула для периода осцилляций незатухающего тока. Показано, что с увеличением плотности электронов влияние кулоновского взаимодействия на характеристики незатухающих токов уменьшается.

Показана возможность возникновения осцилляций незатухающего тока при изменении магнитного поля в двумерных квантовых точках. Природа этих осцилляций связана с электрон-электронным взаимодействием. Получена эмпирическая формула для периода осцилляций незатухающего тока. Период осцилляций по магнитному полю уменьшается с увеличением N , однако период по магнитному потоку через квантовую точку слабо зависит от N .

Четвертая глава посвящена исследованию вертикально-связанных квантовых точек в магнитном поле. Предложена модель для изучения стабильности квантового холловского состояния в системе двух вертикально-связанных квантовых точек при равном единиче факторе заполнения. Вычисления проводились для квантовых точек с несколькими десятками электронов. Изучено влияние примесного потенциала на стабильность квантового холловского состояния.

Для пространственно разделенных электронно-дырочных слоев в сильном магнитном поле вычислена энергия электронно-дырочных пар. Найдены «магические числа» и вычислены незатухающие токи для электронов и дырок. Вычисления показали, что с увеличением межслоевого расстояния число частиц в электронно-дырочном комплексе уменьшается.

В пятой главе представлены результаты исследования физических свойств квантовых проволок в магнитном поле и при его отсутствии. На основе результатов численных расчетов в координатах «плотность – ширина квантовой проволоки» построена фазовая диаграмма перехода электронов в спин-поляризованное состояние.

Проведено исследование электронной структуры двумерной квантовой проволоки в сильном магнитном поле. Показано, что при низких плотностях в сильном магнитном поле электронная плотность разбивается на две туннельно-связанные области.

Для электронно-дырочной жидкости в квантовой проволоке получено аналитическое выражение для энергии и построены зависимости равновесной плотности и энергии на одну электронно-дырочную пару от отношения масс дырки к электрону.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

Автореферат содержит краткое изложение материалов диссертационной работы и полностью отражает основное содержание диссертации.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Результаты, сформулированные в защищаемых положениях, являются новыми. В диссертационной работе получены следующие наиболее важные результаты.

Впервые аналитически и численно показано, что ЭДЖ в квантовых ямах Si/SiGe/Si может быть трехкомпонентной, возможен переход к двухкомпонентной ЭДЖ. Вблизи этого перехода возможна бистабильность, а слабое внешнее воздействие может влиять на свойства ЭДЖ.

Проведенные вычисления показали, что в пленках алмаза возможно образование ЭДЖ при температуре близкой к комнатной.

Найдены новые серии «магических чисел» для полного углового момента электронов в квантовых точках. Предложена эмпирическая формула для периода осцилляций незатухающего тока в квантовых точках и кольцах в сильном магнитном поле.

Найдено условие, при котором квантовое холловское состояние является стабильным в двойной вертикально-связанной квантовой точке с большим числом электронов при нулевой туннельной щели.

На основе численных решений уравнений Кона–Шэма определено число частиц в электронно-дырочном комплексе в зависимости от расстояния между квантовыми ямами.

На основе численных решений уравнений Кона–Шэма построена фазовая диаграмма перехода в спин-поляризованное состояние электронов в квантовой проволоке.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации

Применяемые в диссертационной работе теоретические методы исследования, базирующиеся на использовании теории функционала плотности, позволяют получить новые данные об электронно-дырочной структуре низкоразмерных систем. В работе получен ряд новых значимых результатов, которые представляют интерес для экспериментальных исследований (высокотемпературная ЭДЖ, квазидвумерная ЭДЖ в магнитном поле, осцилляции незатухающего тока в квантовых кольцах и точках, спонтанная спиновая поляризация в квантовых проволоках). Результаты работы можно рекомендовать к использованию в научных и научно-образовательных учреждениях, ведущих научно-исследовательские работы в области физики низкоразмерных структур.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью поставленных задач и методов их решения, внутренней согласованностью и согласием полученных в диссертации результатов с результатами экспериментальных и теоретических исследований других авторов.

Публикации, отражающие основное содержание работы

Результаты диссертации представлены в 23 работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в том числе 18 научных статей опубликовано в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 14 статей опубликовано в журналах, входящих в Web of Science и Scopus.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Представленная диссертация соответствует требованиям паспорта научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, а полученные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности: п. 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы», п. 5 «Разработка математических моделей

построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения».

Замечания по диссертационной работе

1. В основных положениях и результатах, выносимых на защиту, очень много констатации сделанного. Следовало бы ограничиться только выносимыми на защиту Положениями, что, несомненно, сделало бы ценность работы более доступным и ясным. Результаты же приведены в заключении диссертации и автореферата.

2. В заключении диссертации и автореферата результаты приводятся слишком лаконично. Следовало бы их существенно расширить и привести физическое содержание результатов, а не простое их перечисление.

3. Автор использует крайне неудачный термин «точные вычисления». В физике можно говорить об аналитических вычислениях и численных расчетах, точность которых зависит от используемых моделей и приближений.

4. В литературном обзоре на стр. 28 автор утверждает: «Практика показывает, что точные решения уравнений Кона–Шэма, с использованием ППП, дают значительно лучшие результаты, чем другие методы». Это необоснованное и, в общем случае, неверное утверждение. Автору следовало уделить больше внимания обсуждению и обоснованию данного вопроса.

5. В диссертации автор несколько раз использует фразу «на практике...», а именно, «На практике используются различные приближения для $F[n]$ », стр. 26, «На практике используют различные приближения для обменно-корреляционной энергии», стр. 27, «На практике используют различные приближения для обменно-корреляционной энергии», стр. 98. Автору следовало указать на какой «практике» и привести ссылки на соответствующие научные работы.

6. К сожалению, автору не удалось избежать опечаток, неаккуратного оформления текста, рисунков и формул. Наряду с принятыми российскими обозначениями встречаются англоязычные написания единиц измерения физических величин.

В то же время следует отметить, что сделанные замечания не снижают научную значимость и высокую оценку полученных в работе результатов.

Заключение

Диссертационная работа Васильченко Александра Анатольевича «Теоретическое исследование коллективных явлений в электронных и электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности

01.04.07 – Физика конденсированного состояния, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые результаты. Полученные в диссертации результаты и выводы принадлежат автору и имеют высокую научную и практическую значимость.

Диссертационная работа А. А. Васильченко соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 01 октября 2018 г.), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07– Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию Васильченко Александра Анатольевича обсужден и одобрен на заседании объединенного семинара Сибирского физико-технического института и кафедры физики металлов физического факультета Томского государственного университета 14 ноября 2019 г., протокол № 23.

Отзыв составил

Директор Сибирского физико-технического института
имени академика В. Д. Кузнецова
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук
(01.04.07 – Физика конденсированного состояния),
профессор

Потекаев Александр Иванович

20 ноября 2019 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
государственный университет»
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
+7 (3822) 52-98-52; rector@tsu.ru; <http://www.tsu.ru>



Подпись А. И. Потекаева
удостоверено
специалист по кадрам
Медведев Т. М. Серебрякова