

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу Васильченко Александра Анатольевича
«Теоретическое исследование коллективных явлений в электронных и
электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния.

Актуальность избранной темы

В настоящее время исследования низкоразмерных электронных и электронно-дырочных систем является одной из наиболее актуальных и интенсивно развивающихся направлений в физике конденсированного состояния. В системах с пониженной размерностью (квантовые ямы, точки, проволоки) энергетический спектр носителей заряда имеет дискретный характер, что приводит к ряду новых квантовых эффектов. Исследования низкоразмерных структур чрезвычайно интересны с научной точки зрения и перспективны для создания приборов наноэлектроники. Пространственные ограничения на движение носителей заряда приводит к увеличению роли кулоновского взаимодействия в таких системах. Тема диссертационной работы Васильченко А.А. связана с теоретическим исследованием влияния взаимодействия носителей заряда, размерных параметров наноструктур, удерживающих потенциалов, магнитного и электрического поля на свойства носителей заряда в квантовых точках, квантовых ямах и квантовых проволоках. В связи с этим тема диссертационной работы несомненно является актуальной и имеет большое научное значение.

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитированных источников.

Во введении обосновывается актуальность исследований, формулируются цель, задачи исследований, положения и основные результаты, показаны научная новизна и практическая значимость работы, предоставлена информация об апробации работы, о публикациях и личном вкладе автора, а также приведена структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе приводится литературный обзор. Кратко изложены основы теории функционала плотности и приведено сравнение результатов, полученных в рамках теории функционала плотности, с точными результатами. Приведены результаты точных вычислений для квантовых точек с небольшим числом электронов. Эти результаты в дальнейшем будут сравниваться с результатами, полученными в диссертационной работе. Представлены экспериментальные результаты для электронно-дырочной жидкости в квантовых ямах, осцилляций незатухающего тока в кольцах, переходы металл-диэлектрик в двумерном электронном газе и условия стабильности квантового холловского состояния в двуслойных двумерных электронных системах. Все эти явления исследуются теоретически в диссертации.

Во второй главе исследуются свойства квазидвумерной электронно-дырочной жидкости в полупроводниковых структурах. Для вычисления энергии и равновесной плотности электронно-дырочной жидкости используется теория функционала плотности. Уравнения Шредингера для электронов и дырок решаются как численно, так и приближенно аналитически. Получено аналитическое выражение для энергии электронно-дырочной пары в зависимости от масс электронов и дырок, их анизотропии и числа долин. На основе этого выражения можно легко определять возможность образования электронно-дырочной жидкости в различных полупроводниковых структурах.

Особо стоит отметить полученные новые результаты для электронно-дырочной жидкости в SiGe/Si квантовых ямах. Аналитическими и численными методами найдено, что в этих квантовых ямах при низких

концентрациях германия образуется трехкомпонентная электронно-дырочная жидкость. С повышением концентрации германия происходит переход к двухкомпонентной электронно-дырочной жидкости. Проведены расчеты для широкой области значений ширины квантовой ямы и концентрации германия. Результаты вычислений для электронно-дырочной жидкости в SiGe/Si квантовых ямах очень хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Также получено хорошее согласие вычисленной плотности электронно-дырочной жидкости в SiO₂/Si квантовых ямах с экспериментальными результатами.

Представленные результаты показывают, что в пленках алмаза с толщиной в несколько нанометров возможно образование четырехкомпонентной электронно-дырочной жидкости. Наибольшая энергия связи и равновесная плотность достигается в (111) пленках алмаза. Для (111) пленок алмаза проведена оценка критической температуры электронно-дырочной жидкости, которая оказывается близкой к комнатной температуре.

Интересные результаты получены для электронно-дырочной жидкости в магнитном поле. С увеличением магнитного поля равновесная плотность электронно-дырочной жидкости значительно увеличивается. Показано, что магнитное поле может управлять переходом между трехкомпонентной и двухкомпонентной электронно-дырочной жидкости.

В целом, в главе 2 получены результаты, которые имеют хорошее согласие с экспериментальными результатами, а также представлены результаты важные для новых экспериментов.

В третьей главе исследуются электронные свойства двумерных электронов в сильном магнитном поле. Объектом исследования являются квантовые точки и кольца с числом электронов от нескольких единиц до нескольких десятков. Магнитное поле берется таким, что все электроны являются спин-поляризованными. Выполненные вычисления в рамках теории функционал плотности для квантовых точек с небольшим числом электронов приводят к хорошему согласию с результатами точных

вычислений. Найдены новые серии магических чисел для полного углового момента электронов и объяснена их природа.

Основной результат связан с исследованием незатухающих токов в квантовых точках и кольцах. Вычислены амплитуда и период осцилляций незатухающих токов. На основе вычислений предложена эмпирическая формула для периода осцилляций незатухающего тока.

В четвертой главе исследуются электронные и электронно-дырочные свойства двух вертикально-связанных квантовых точек в магнитном поле. Как и в главе 3, уравнения Кона-Шэма численно решаются для спин-поляризованных электронов. Сравнение полученных результатов точными результатами показало, что расхождение составило около 5%. Найдены новые серии магических чисел для полного углового момента электронов при различных значениях величины туннельной щели.

Для двух одинаковых квантовых точек найдены условия стабильности квантового холловского состояния. В координатах магнитное поле – расстояние между слоями построена фазовая диаграмма перехода в квантовое холловское состояние при нулевой туннельной щели.

С помощью теории функционала плотности исследуются пространственно разделенные двумерные электронно-дырочные слои в магнитном поле. Численно решались уравнения Кона-Шэма для электронов и дырок и найдено количество электронно-дырочных пар в зависимости от расстояния между слоями. Как и в главе 3, найдены наборы магических чисел для полного углового момента электронов и дырок и вычислены незатухающие токи.

В пятой главе приведены результаты исследования электронной структуры квантовых проволок. На основе численных решений уравнений Кона-Шэма для квазиодномерных электронов построена фазовая диаграмма перехода в спин-поляризованное состояние. Показано, что в узких квантовых проволоках поляризованное состояние может наблюдаться при достаточно высоких плотностях электронов. На основе приближенного аналитического решения нелинейного уравнения

Шредингера получена величина критической одномерной плотности электронов, которая находится в хорошем согласии с численными результатами.

Для электронно-дырочной жидкости в квантовой проволоке получено аналитическое выражение для энергии в зависимости от масс носителей и числа долин. Для InAs квантовой проволоки получено хорошее согласие с экспериментальными результатами.

В заключении приведены основные научные результаты диссертационной работы.

В целом диссертация Васильченко А.А. является законченным исследованием, в котором представлено решение актуальных задач в области физики конденсированных сред.

Новизна научных положений и выводов диссертации

К числу основных научных результатов, определяющих научную новизну диссертационного исследования, относятся следующие:

1. Аналитическими и численными методами найдены условия стабильности электронно-дырочной жидкости в квантовых ямах Si/SiGe/Si. Показано, что в этой структуре в зависимости от содержания германия может образовываться трехкомпонентная или двухкомпонентная электронно-дырочная жидкость. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментом.

2. Показано, что в магнитном поле плотность электронно-дырочных пар увеличивается и зависимости факторов заполнения уровней Ландау от магнитного поля имеют форму плато.

3. Найдено, что в пленках алмаза возможно образование электронно-дырочной жидкости с критической температурой близкой к комнатной.

4. Получена эмпирическая формула для периода осцилляций незатухающего тока в квантовых точках и кольцах.

5. Построена фазовая диаграмма перехода в квантовое холловское состояние в двойных квантовых точках при факторе заполнения уровня Ландау, равном единице.

6. В рамках теории функционала плотности показано, что в сильном магнитном поле могут образовываться электронно-дырочные комплексы с большим числом электронно-дырочных пар. Вычислены незатухающие токи электронов и дырок и показано, что токи имеют осцилляционный вид.

7. Построена фазовая диаграмма перехода в спин-поляризованное состояние электронов в квантовой проволоке. Приближенно аналитически решено уравнение Шредингера и получена оценка величины критической плотности, которая находится в хорошем согласии с численными результатами.

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми и представляют собой несомненный интерес для специалистов в области теоретической и экспериментальной физики конденсированного состояния. Разработанные методы и подходы в дальнейшем могут применяться для исследований в области теории конденсированных сред и в других областях физики.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Используемый в работе метод функционала плотности соответствует цели и научным задачам работы и отвечает современному состоянию исследований в области физики конденсированных сред. Все научные результаты и выводы обоснованы надежностью применяемых численных и аналитических методов.

Достоверность результатов исследований подтверждена хорошим согласием с точными результатами других авторов и с экспериментальными результатами для электронно-дырочной жидкости в квантовых ямах и проволоках.

Основные результаты диссертации опубликованы в 43 научных работах, в том числе 18 научных статей опубликованы в российских журналах из перечня ВАК и 14 статей проиндексированы в БД Web of Science и Scopus.

Научные исследования проводились в рамках проектов РФФИ и Гос. задания Министерства образования и науки РФ.

Замечания

Однако к работе имеются следующие замечания:

1. В предлагаемой модели для изучения свойств электронно-дырочной жидкости не учтено влияние различия диэлектрических проницаемостей и масс носителей заряда в разных областях гетероструктуры.

2. В главе 2 стоило бы поместить рисунки структур, для которых проводятся вычисления. Это упростило бы понимание постановки задач.

3. Для подтверждения достаточно хорошего согласия теории с экспериментальными результатами на рисунке 2.15 на странице 70 стоило бы привести погрешности экспериментальных данных.

4. В подписи к рисунку 2.1 на стр. 49 не расшифрованы обозначения на графике. А на графике рисунка 2.27 на стр. 91 не расшифрованы единицы измерения.

5. В разделе 3.2 (страница 116) получен важный результат о влиянии кулоновского взаимодействия на характеристики незатухающих токов, однако не указано при каких плотностях электронов влияние кулоновского взаимодействия уменьшается.

6. Результаты других авторов из параграфов 3.2, 4.1 и 5.1 лучше было бы вынести в главу 1 (обзор).

Но отмеченные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа Васильченко Александра Анатольевича «Теоретическое исследование коллективных явлений в электронных и электронно-дырочных системах в низкоразмерных структурах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые результаты.

Основные результаты диссертации в полной мере опубликованы соискателем в научных изданиях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание, основные идеи и выводы.

Диссертационная работа Васильченко Александра Анатольевича по актуальности темы исследования, обоснованности научных положений и выводов, достоверности и новизне полученных результатов соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. постановления Правительства РФ от 01.10.2018 г. № 1168), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Профессор кафедры инженерных дисциплин и управления,

Новороссийский политехнический институт (филиал)

ФГБОУ ВО Кубанский государственный технологический университет,

доктор физико-математических наук,

(01.04.05 оптика)

Шеманин Валерий Геннадьевич

Новороссийский политехнический институт (филиал)

ФГБОУ ВО Кубанский государственный технологический университет,

Профессор кафедры инженерных дисциплин и управления,

353900, Новороссийск, ул. К.Маркса, 20

Тел. 8(8617)641814

vshemanin@mail.ru

<http://www.npi.edu.ru>

Подпись В.Г. Шеманина заверяю

Ученый секретарь Ученого совета НПИ

20 ноября 2019 г.



Вишневецкая В.В.