

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Ратникова Павла Вячеславовича
«Электронные свойства планарных гетероструктур на основе графена»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов, происходящих в низкоразмерных гетероструктурах. Это связано с широким применением гетероструктур в современной микро- и нанoeлектронике, а также с возможностью создания на их основе объектов нанометровых масштабов. Появление нового двумерного материала - графена, моноатомного слоя атомов углерода, образующих гексагональную решетку, открыло новые перспективы в создании нанoeлектронных устройств с высокой подвижностью носителей заряда. Кроме этого свойства, графен является одним из самых прочных и легких материалов, обладает высокой теплопроводностью. Структуры на основе графена не проницаемы для газов и жидкостей, что позволяет их использовать в качестве сверхчувствительных сенсоров. Все это привело к появлению множества теоретических и экспериментальных работ по исследованию свойств графена. Графен и структуры на его основе интересны не только с точки зрения прикладных приложений. В первую очередь представляется важным и интересным исследовать особенности электронного транспорта в графене, понимание природы которых позволит в дальнейшем применять материалы на основе графена в современной нанoeлектронике.

Исследования в области гетероструктур с применением графена ведутся для создания слоистых гетероструктур, где графен используется для формирования тонких проводящих слоев. Примером таких структур являются гетероструктуры с «инкапсулированным» графеном, в которых слои графена разделены одним или несколькими моноатомными слоями гексагонального нитрида бора. Применение графена приводит к миниатюризации гетероструктур только в одном из направлений – поперек слоев гетероструктуры. Однако, при этом не в полной мере используется основное преимущество графена – его плоская геометрия.

Диссертационная работа П.В. Ратникова посвящена теоретическому анализу электронных свойств и особенностей электронного транспорта в планарных гетероструктурах на основе графена и его щелевых модификаций. Диссертационная работа является актуальной

как с точки зрения фундаментальности научного исследования, так и с точки зрения практических приложений результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена глубоким физическим анализом явлений, обнаруженных при исследовании электронных свойств и особенностей электронного транспорта в планарных гетероструктурах на основе графена, комплексным подходом к аналитическому и численному анализу свойств исследуемых структур, а также тщательным сопоставлением с результатами других исследователей. В диссертационной работе последовательно рассмотрен ряд планарных гетероструктур на основе графена: лист графена с одним или с двумя барьерами, в том числе с магнитным барьером; одиночная квантовая яма; одномерные сверхрешетки, составленные из чередующихся полосок бесщелевого графена и его щелевой модификации, а также получающиеся за счет чередования областей с разной скоростью Ферми. Автор получил ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Предложен и применен набор теоретических моделей для описания электронных свойств планарных гетероструктур на основе графена.
2. Обнаружено возникновение эффекта фильтрации носителей заряда по углу падения для случая, когда скорость Ферми в щелевой модификации графена больше, чем скорость Ферми в бесщелевом графене.
3. Показано расщепление по спину энергетического спектра носителей заряда в несимметричной квантовой яме, сформированной из различных модификаций графена.
4. Для магнитоплазмонов в планарных сверхрешетках получено дисперсионное соотношение, учитывающее вклад не только внутризонных виртуальных переходов носителей заряда, но и вклад межзонных виртуальных переходов.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и выводов. Работа изложена на 193 страницах, содержит 41 рисунок, 1 таблицу, два приложения и список литературы из 212 наименований.

Во введении сформулирована цель работы, обоснованы актуальность и практическая значимость полученных результатов, представлен краткий обзор основных этапов развития современной микроэлектроники, приведена история получения графена, и обсуждены перспективы его применения в наноэлектронике.

В первой главе подробно изложен набор стандартных теоретических подходов, которые в дальнейшем использованы в диссертационной работе для теоретического анализа электронных свойств и особенностей электронного транспорта в планарных гетероструктурах

на основе графена и его щелевых модификаций. Вначале главы описана кристаллическая решетка и зонная структура бесщелевого графена. Далее приведен математический формализм, применяемый для описания свойств носителей заряда в бесщелевом графене: модель сильной связи, приближение эффективной массы, оператор спиральности (киральности) носителей заряда и обращение времени, фаза Берри и поведение носителей заряда в графене в магнитном поле. В первой главе автором введено понятие оператора псевдочетности, которое в дальнейшем используется для описания долинных свойств гетероструктур на основе графена. Также в первой главе представлен вывод уравнения для огибающей волновой функции в случае щелевой модификации графена.

Во второй главе рассмотрен вопрос о туннелировании носителей заряда через области с конечной энергетической щелью. В качестве потенциальных барьеров в работе рассмотрены полосы щелевых модификаций графена или магнитные барьеры – области конечных размеров с приложенным однородным постоянным магнитным полем. В начале главы получено решение задачи о вероятности прохождения носителей заряда через одиночный потенциальный барьер – полосу щелевой модификации графена. Решение этой задачи позволило автору понять особенности поведения носителей заряда в планарных гетероструктурах на основе графена. В частности, было обнаружено, что при надбарьерном прохождении носителей заряда возможен эффект «углового фильтра», когда угол падения превышает определенное пороговое значение, и вероятность прохождения оказывается экспоненциально малой. Проведено обобщение задачи о вероятности прохождения носителей заряда через одиночный потенциальный барьер, и получено решение для случая прохождения носителей заряда через две полосы щелевых модификаций графена. Показано, что эффект фильтрации носителей заряда существует и в случае системы с двумя потенциальными барьерами. Кроме того, рассмотрена задача о прохождении носителей заряда через полосу щелевой модификации графена и область приложения магнитного поля.

В третьей главе исследованы приграничные состояния в окрестности одиночного гетероперехода, образованного бесщелевым графеном и его щелевой модификацией, и сформулировано условие формирования таких состояний. Автором выбрана модель резкого гетероперехода, являющегося границей между двумя полуплоскостями. Для описания гетероструктуры использовано граничное условие, соответствующее условно непрерывности плотности потока частиц. С применением понятия псевдочетности показано, что в рассматриваемой структуре существует «долинная поляризация» носителей заряда, то есть приграничные состояния существуют в одной из двух долин в зависимости от знака проекции

квазимпульса на границу раздела. Анализ проведен в приближении слабой связи, позволившем описать поведение носителей заряда методом огибающей волновой функции.

В четвертой главе исследована одиночная квантовая яма в гетероструктуре, состоящей из полосы бесщелевого графена, по обеим сторонам которой находятся щелевые модификации графена. Автором найден спектр размерного квантования в квантовой яме и показано, что в случае несимметричных квантовых ям, когда в качестве потенциальных барьеров используются разные щелевые модификации графена, энергетический спектр оказывается различным в каждой из долин. Эта особенность названа в работе «псевдоспиновым расщеплением» энергетического спектра носителей заряда. Также исследован вопрос о спектре экситона в графеновой планарной квантовой яме и проанализировано влияние на него внешнего электрического поля (эффект Штарка). В конце четвертой главы на качественном уровне обсужден вопрос о возможных способах экспериментального исследования изученных эффектов.

В пятой главе рассмотрены планарные свехрешетки на основе графена, сформированные при чередовании полосок бесщелевого графена и его щелевой модификации. Автором выведено дисперсионное уравнение для носителей заряда в одномерной свехрешетке, образованной чередованием полосок бесщелевого графена и его щелевой модификации. Далее рассмотрена свехрешетка на основе графена с периодически изменяющейся величиной скорости Ферми, и на качественном уровне проанализирована вольт-амперная характеристика такой свехрешетки. Также рассмотрены политипные свехрешетки со свехъячейками, представляющими собой несимметричные квантовые ямы. На примере трехтипной свехрешетки показано существование псевдоспинового расщепления энергетического спектра носителей заряда. В пятой главе также рассмотрен вопрос о возможных приложениях свехрешеток в качестве полевого транзистора или основы для терагерцового лазера, также обсуждается возможность применения свехрешеток на основе графена в плазмонике и оптоэлектронике. Обнаруженная нелинейность на вольт-амперных характеристиках свехрешетки позволяет говорить о возможности создания на ее основе перестраиваемого полевого диода.

В шестой главе проведено исследование коллективных возбуждений в одномерных свехрешетках с изменяющейся энергетической щелью, которые были рассмотрены в начале пятой главы. В рамках приближения хаотических фаз проведено детальное исследование плазмонов и магнито-плазмонов. Для плазмонов автором диссертации получены аналитические выражения для закона дисперсии. Для магнитоплазмонов получено

дисперсионное уравнение, решение которого относительно частоты при заданном значении волнового вектора, позволяет получить их дисперсионные зависимости.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

В качестве замечаний по диссертационной работе П.В. Ратникова можно отметить:

1. В тексте диссертационной работы и в тексте автореферата в явном виде отсутствует раздел "Научная новизна" работы. Однако, в автореферате присутствует раздел "Научная значимость", в котором изложена научная новизна диссертационной работы.
2. При формулировании условий формирования гетероконтактов в диссертационной работе всегда идет речь о контактах первого типа. Автор указывает, что рассмотрение контактов первого типа позволяет избежать спонтанного рождения электронно-дырочных пар и, следовательно, предотвратить возможное шунтирование приборов углеродной наноэлектроники. Из текста работы неясно насколько это условие является критичным и к каким еще эффектам может привести наличие контактов других типов.
3. В четвертой главе при рассмотрении вопроса об экситоне в графеновой планарной квантовой яме вводится радиус обрезания d_0 . Получаемый результат явным образом зависит от величины этого параметра, но в работе отсутствует его физическая интерпретация. Не совсем понятно какой физический смысл имеет параметр d_0 .
4. Не ясно можно ли в моделях, представленных в пятой главе диссертационной работы, учесть эффекты, связанные с деформацией графена; насколько учет деформации усложнит решение задачи и как изменит его вид.

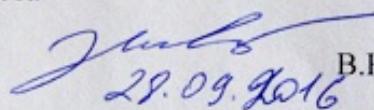
Представленные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы, которая представляет собой оригинальное и законченное научное исследование. Полученные результаты являются новыми и представляют значительный научный интерес. Актуальность, новизна, практическая значимость диссертационной работы, а также личный вклад автора не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в статьях в научных изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК. Диссертационная работа хорошо оформлена, материал представлен понятно и логически последовательно. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа П.В. Ратникова «Электронные свойства планарных гетероструктур на основе графена» полностью соответствует всем требованиям,

предъявляемым Положением ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник физического факультета
ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук

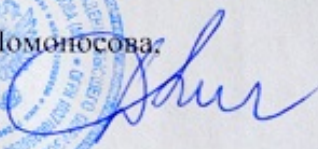

28.09.2016

В.Н. Манцевич

Подпись В.Н. Манцевича удостоверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
профессор,
доктор физико-математических наук





Н.Н. Сысоев

Адрес официального оппонента:

119991 Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, корп. 2

Тел.: 8 (495) 939-50-72

эл. почта: vmantsev@gmail.com