

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт спектроскопии
Российской академии наук
Проф. В.Н. Задков



«7» октября 2016 г.

Отзыв

ведущей организации о диссертационной работе Ратникова Павла Вячеславовича
«Электронные свойства планарных гетероструктур на основе графена»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертационная работа П.В. Ратникова посвящена теоретическому изучению планарных гетероструктур на основе графена. Актуальность выбранной темы обусловлена громадным интересом к новому двумерному углеродному материалу графену и технологическому потенциалу его применения в нанoeлектронике. Несмотря на значительные экспериментальные достижения, многие фундаментальные вопросы физики наноструктур на основе графена остаются по сей день малоизученными.

В диссертационной работе П.В. Ратникова последовательно рассмотрены планарные гетероструктуры на основе графена: одиночный и двойной потенциальные барьеры, гетеропереходы, квантовая яма и сверхрешетки. В качестве потенциальных барьеров предлагалось использовать так называемые щелевые модификации графена, в которых возникает щель в энергетическом спектре либо за счет взаимодействия листа графена с материалом подложки, либо как следствие осаждения определенных атомов или молекул на поверхность графена. Главным образом, автора интересовали такие вопросы, как прохождение носителей тока через конечную область щелевой модификации графена, а также через конечную область с приложенным магнитным полем; появление приграничных состояний у границы гетероперехода между бесщелевым графеном и его щелевой модификацией; одночастичный энергетический спектр носителей тока в квантовой яме, составленной из полосы бесщелевого графена, по краям которой находятся области щелевой модификации графена; энергетический спектр экситона в такой квантовой яме; дисперсионная зависимость носителей тока в сверхрешетках с чередующимися областями бесщелевого графена и его щелевой модификации или с чередованием скорости Ферми; закон дисперсии коллективных возбуждений (плазмонов и магнитоплазмонов) в сверхрешетках.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, благодарностей, двух приложений, списка работ автора диссертации и списка цитируемой литературы. Ее объем составляет 193 страницы.

Введение начинается с небольшого обзора истории развития микроэлектроники. Обращается внимание на переход в настоящий момент к нанoeлектронике. Отмечена важность получения графена в связи с большим потенциалом его использования в этой области. Тем

самым была продемонстрирована актуальность темы диссертационного исследования. Введение завершается перечнем основных результатов диссертации.

Первая глава является обзорной и выполняет справочную роль. В ней вводятся необходимые для дальнейшего понимания материала диссертации понятия: кристаллическая решетка и зонная структура бесщелевого графена, модель сильной связи, приближение эффективной массы, обращение времени и оператор спираальности, топологическая сингулярность и фаза Берри, описание носителей тока в графене в магнитном поле, оператор псевдоотчетности.

Вторая глава посвящена исследованию надбарьерного прохождения носителей тока в планарных гетероструктурах на основе графена с одним или двумя потенциальными барьерами. В случае двух потенциальных барьеров рассмотрены два варианта: 1) оба потенциальных барьера являются энергетическими щелями щелевых модификаций графена; 2) один из двух потенциальных барьеров является магнитным, т.е. областью бесщелевого графена с приложенным постоянным однородным магнитным полем. Найдено условие аномального прохождения носителей тока (с вероятностью единица). Построены графики угловой зависимости вероятности прохождения носителей тока через такие структуры.

В третьей главе исследованы приграничные состояния в одиночном гетеропереходе на основе графена. Было найдено условие возникновения таких состояний. На основе полученных результатов был предсказан эффект долиной поляризации тока, текущего вдоль границы раздела гетероперехода.

В четвертой главе получено дисперсионное уравнение для носителей тока с учетом их долиной принадлежности. Было показано, что в несимметричных квантовых ямах возникает расщепление энергетического спектра по псевдоспину. Также были исследованы приграничные состояния. Анализ показал, что эти состояния могут существовать только в определенных интервалах энергии и квазиимпульса при пересечении дисперсионных кривых бесщелевого графена и его щелевой модификации. Была найдена энергия связи экситона как в основном состоянии, так и в возбужденном состоянии. Квантовая яма рассматривалась как квазиодномерный полупроводник. При этом эффективные массы носителей тока находились с помощью полученного ранее дисперсионного уравнения. Затем было исследовано влияние электрического поля на уровни экситона.

Пятая глава посвящена изучению одночастичного энергетического спектра сверхрешеток на основе графена. Была сформулирована модель для описания планарной сверхрешетки на основе графена с полосками бесщелевого графена, которые чередуются с полосками его щелевой модификации. Также рассмотрена сверхрешетка с чередующейся скоростью Ферми. Было показано, что в такой сверхрешетке эффективными квантовыми барьерами являются области с большей скоростью Ферми. Затем была рассмотрена полупериодическая сверхрешетка, сверхячейка которой представляет собой несимметричную квантовую яму. Было продемонстрировано, что в такой сверхрешетке имеется расщепление энергетического спектра по псевдоспину. Найдено достаточное условие его возникновения.

Шестая глава посвящена исследованию коллективных возбуждений в планарных сверхрешетках на основе графена в рамках приближения хаотических фаз. Были получены аналитические результаты для дисперсионной зависимости плазмонов. Для магнитоплазмонов подобным образом выведено дисперсионное уравнение в случае заселения низшего уровня Ландау.

Оценивая работу П.В. Ратникова, хотелось бы отметить, прежде всего, фундаментальность и новизну полученных результатов. Исследования показали ряд характерных особенностей физики наноструктур. Использование же плоской геометрии и двумерного материала графена позволило найти ряд вызывающих интерес эффектов.

Полученные результаты представляют несомненный интерес, как для фундаментальной науки, так и для практики. Они могут быть использованы в исследованиях, проводимых в

ФИАН, МФТИ, ИОФ РАН, ИСАН, Физическом факультете МГУ, ИФТТ РАН и в других научно-исследовательских центрах. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК, многократно докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат правильно и в полной мере отражает содержание диссертации.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Было бы интересно исследовать помимо экситонов в планарных квантовых ямах на основе графена также другие оптические свойства этих гетероструктур. Можно было бы исследовать и влияние магнитного поля на уровни экситона по аналогии с эффектом Зеемана. Соответственно интерес представляет также магнитооптика рассмотренной квантовой ямы.
2. Не проведен количественный анализ вольт-амперной характеристики сверхрешетки на основе графена с чередованием скорости Ферми (автор ограничился ее качественным рассмотрением).

Сделанные замечания имеют, скорее, характер пожеланий для будущей работы и не снижают общей ценности диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне, не влияя на общую высокую оценку работы. Диссертация «Электронные свойства планарных гетероструктур на основе графена» полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, а ее автор П.В. Ратников безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв утверждён и одобрен на заседании семинара лаборатории спектроскопии наноструктур ИСАН 05. 10.2016, протокол № 1.

Отзыв составил
заведующий лабораторией спектроскопии наноструктур
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт спектроскопии РАН (ИСАН),
профессор МФТИ
кандидат физико-математических наук
Лозовик Юрий Ефремович
108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5
Тел.: 8 (495) 851-08-81
E-mail: lozovik@isan.troitsk.ru

Отзыв утверждён на заседании Ученого Совета от 06.10.2016, протокол N 7

Ученый секретарь
Института спектроскопии РАН
кандидат физико-математических наук
Е.Б. Перминов

