

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию П.В. Ратникова

“Электронные свойства планарных гетероструктур на основе графена”,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

Диссертационная работа П.В. Ратникова посвящена исследованию электронных свойств планарных гетероструктур на основе двумерного углеродного материала графена. Теоретическое исследование этих гетероструктур вызвано их большим технологическим потенциалом. Тем не менее, оказалось, что рассматриваемые в диссертации планарные гетероструктуры до сих пор не имели достаточно полного описания в научной литературе. По многим направлениям работы П.В. Ратникова являются новаторскими. Несомненной заслугой автора диссертации стало указание на принципиальную важность этих гетероструктур для дальнейшего технологического продвижения в области применения графена в нанoeлектронике, в частности, в изготовлении интегральных схем на основе графена.

Актуальность темы диссертационной работы связана с необходимостью глубокого понимания электронных свойств гетероструктур, состоящих как из безщелевого графена, так и его щелевых модификаций. Идея возможности составления гетероструктур плоской геометрии из графена и его щелевых модификаций является отправной точкой для всего диссертационного исследования. Следует подчеркнуть, П.В. Ратников самостоятельно пришел к этой идее.

В ходе выполнения работы был описан ряд интересных эффектов, которые можно наблюдать на эксперименте. Хотя для получения этих предсказаний были использованы весьма простые и стандартные подходы теоретической физики, это ни в коей мере не умаляет важности и значимости проведенной работы. Были получены следующие основные результаты.

- Исследовано прохождение носителей тока в планарных гетероструктурах с потенциальным барьером, образованным полоской щелевой модификации графена. Найдено условие аномального надбарьерного прохождения носителей тока в таких структурах. Предсказан эффект ограничения по углу падения носителей тока на потенциальный барьер в случае, когда скорость Ферми в щелевой модификации графена больше скорости Ферми в бесщелевом графене: при углах падения, больших определенного значения, вероятность туннелирования носителей тока экспоненциально мала при любой энергии (*эффект фильтрации* носителей тока по углу падения). Решена задача о прохождении носителей тока в планарной гетероструктуре с двумя потенциальными барьерами, один из которых является запрещенной зоной щелевой модификации графена, а второй барьер магнитный.
- Исследованы приграничные состояния у одиночного планарного гетероперехода между областями бесщелевого графена и его щелевой модификации. Установлено, что достаточным условием их возникновения является пересечение дисперсионных кривых бесщелевого графена и его щелевой модификации. Показано, что эти состояния являются долинно-поляризованными. Предсказан *эффект долинной поляризации тока*, протекающего вдоль рассматриваемого гетероперехода.

- Исследованы энергетические спектры планарных квантовых ям на основе графена, потенциальными барьерами в которых являются области щелевых модификаций графена. Показано, что в несимметричной квантовой яме, составленной из различных модификаций графена, *энергетический спектр носителей тока расщеплен по псевдоспину*: экстремумы дисперсионных кривых смещаются от дираковских точек в разных долинах в разные стороны. В симметричной квантовой яме такой эффект отсутствует. Найдена энергия связи экситона в такой квантовой яме. Исследовано влияние электрического поля на энергетические уровни экситона. Получено условие возникновения *линейного эффекта Штарка*. Найдена квадратичная по напряженности электрического поля поправка к экситонным уровням (*квадратичный эффект Штарка*).
- Решена задача об энергетическом спектре носителей тока в планарной сверхрешетке на основе графена. Получено дисперсионное соотношение для планарной сверхрешетки с одномерной модуляцией как энергетической щели, так и скорости Ферми. Качественно объяснено *появление участка с отрицательной дифференциальной проводимостью* в вольт-амперной характеристике для сверхрешетки с модуляцией скорости Ферми при наложении напряжения поперек направления такой модуляции.
- Исследованы политипные планарные сверхрешетки, сверхъячейки которых представляют собой несимметричные квантовые ямы. Показано, что в таких сверхрешетках возникает *псевдоспиновое расщепление энергетического спектра*. Найдено достаточное условие для его появления.
- Получен в аналитическом виде закон дисперсии плазмонов и магнитоплазмонов в планарных сверхрешетках на основе графена.

Полученные в диссертации результаты, несомненно, важны как для понимания фундаментальных аспектов физики двумерных наноструктур, так и для дальнейшего исследования гетероструктур на основе графена как элементов наноэлектроники.

Все результаты, излагаемые в диссертации, являются оригинальными и получены автором впервые. Обоснованность и достоверность выводов и результатов диссертационной работы обеспечены использованием стандартных и хорошо себя зарекомендовавших методов теоретической физики.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, благодарностей, 2 приложений, списка работ автора из 17 пунктов и списка цитируемой литературы, включающего 212 ссылок. Она изложена на 193 страницах, включая 41 рисунок, 1 таблицу и 1 вкладку.

Во введении кратко изложена история создания интегральных схем и основных электронных и опто-электронных приборов. Была подчеркнута важность открытия графена в свете большого потенциала его использования в наноэлектронике. Введение оканчивается кратким изложением основных результатов диссертации.

Первая глава содержит литературный обзор, в котором приведены основополагающие сведения, необходимые для дальнейшего понимания материала диссертации.

Во второй главе исследовано надбарьерное прохождение носителей тока в планарных гетероструктурах на основе графена. Рассмотрена гетероструктура с одним и двумя потенциальными барьерами.

В третьей главе рассмотрены приграничные состояния в одиночном гетеропереходе на основе графена. Формулируется условие возникновения таких состояний. Предсказывается протекание долиннополяризованного тока вдоль границы раздела.

В четвертой главе исследуются свойства одиночной планарной квантовой ямы, в которой потенциальными барьерами являются запрещенные зоны щелевых модификаций графена. Получено дисперсионное уравнение с учетом долиной принадлежности носителей тока. С помощью него показано, что возникает расщепление энергетического спектра по псевдоспину. Также были исследованы приграничные состояния в такой квантовой яме. Показано, что эти состояния могут существовать только в определенных интервалах энергии и квазиимпульса при пересечении дисперсионных кривых бесщелевого графена и его щелевой модификации. Далее исследован экситон в такой квантовой яме. Считалось, что она представляет собой квазиодномерный полупроводник с эффективными массами носителей тока, которые находились с помощью полученного дисперсионного уравнения. Найдена энергия связи экситона как в основном состоянии, так и в возбужденном состоянии. Исследовано влияние электрического поля на уровни экситона.

Пятая глава посвящена изучению энергетического (одночастичного) спектра сверхрешеток на основе графена. Сформулирована модель для описания планарной сверхрешетки на основе графена с одномерной модуляцией запрещенной зоны — полосы бесщелевого графена чередуются с полосками его щелевой модификации. Для вывода дисперсионного соотношения использован метод матрицы переноса. Далее рассмотрена сверхрешетка с чередующейся скоростью Ферми. Модель для ее описания аналогична той, которая предложена для описания предыдущего типа сверхрешеток, но теперь скорость Ферми считалась кусочно-постоянной, а энергетическая щель — равной нулю. Указано, что в такой сверхрешетке эффективными квантовыми барьерами являются области с большей скоростью Ферми. Качественно рассмотрена вольт-амперная характеристика такой сверхрешетки. Рассмотрена политипная сверхрешетка А-В-С, где А и С — щелевые модификации графена с разными энергетическими щелями, В — бесщелевой графен. Было показано, что дисперсионные кривые носителей тока в разных долинах различны, то есть имеется расщепление энергетического спектра по псевдоспину.

Шестая глава посвящена исследованию коллективных возбуждений в планарных сверхрешетках на основе графена с одномерной периодической модуляцией энергетической щели. Исследование выполнено в рамках приближения хаотических фаз. Сначала исследуются плазмоны в планарной сверхрешетке. Вводится ее эффективное модельное описание. Выделены два случая: либо уровень Ферми попадает в одну из минищелей, либо уровень Ферми лежит в одной из минизон. В первом случае движение носителей тока квазиодномерно (движение только вдоль полосок бесщелевого графена), а во втором случае оно квазидвумерно. Для этих двух случаев был посчитан поляризационный оператор. Кулоновское взаимодействие было взято таким же, как и в системе параллельно лежащих друг другу в одной плоскости полупроводниковых нитей. Этих данных достаточно для определения аналитической зависимости частоты плазмонов от их импульса. Подобным образом исследуются магнитоплазмоны в планарной сверхрешетке.

В заключении автор весьма обстоятельно высказывает свое мнение о недавних или текущих исследованиях в области графеновых гетероструктур. Автор обосновывает преимущества планарных гетероструктур перед слоистыми гетероструктурами с использованием графена. Это очень интересная точка зрения и она, конечно, заслуживает внимания. Подчеркнем, хотя сама диссертация прямо не посвящена вопросам нанoeлектроники, чувствуется, что ее автор уделяет им немало внимания. В конце заключения приведены общие выводы по проделанной работе.

Далее автор выражает благодарности своему научному руководителю, своим товарищам и всем людям, которые его поддерживали в процессе написания диссертации.

В приложениях излагаются два вопроса: А) волновая функция носителей тока в бесщелевом графене в магнитном поле с определенной проекцией псевдоспина на нормаль к плоскости графена (к главе 1), Б) вычисление поляризационного оператора для носителей тока в планарной сверхрешетке (к главе 6).

Автореферат полно отражает содержание диссертации, которая оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Ее материалы своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых ВАК, докладывались на российских и международных конференциях.

По объему, новизне, значимости для практики и качеству проведенных исследований диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ “О присуждении ученых степеней”, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор П.В. Ратников заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Старший научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН),

кандидат физико-математических наук

Силин Андрей Павлович

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Тел.: +7 (499) 135-75-11



Подпись А.П. Силина удостоверяю:

Ученый секретарь ФИАН,

кандидат физико-математических наук

М.М. Цвентух



« 23 » VI 2016 года