Отзыв официального оппонента 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

Актуальность темы диссертации. В последние годы исключительный интерес привлекают физические явления в графене – двумерном слое атомов углерода, упорядоченных в гексагональную решетку. Ключевой особенностью графена является линейная дисперсия носителей тока. Это приводит к ряду особенностей известных физических явлений в графене и к появлению новых эффектов, отсутствующих в полупроводниках с параболическим спектром.

Одним из наиболее ярких эффектов такого типа является отсутствие рассеяния электронов в графене назад и «клейновское» туннелирование. Из-за нулевой ширины запрещенной зоны электростатический потенциал, приложенный к графену, не может «запереть» электрон. Это обстоятельство не только является фундаментальным проявлением киральности электронов в графене, но и препятствует созданию приборов на его основе. Таким образом возник интерес к изучению гетероструктур на основе графена, в частности, созданию полосок на основе графена и реализации щелевой модификации графена, за счет помещения графена на подложку.

Диссертационная работа П.В. Ратникова посвящена теоретическому изучению именно таких систем: планарных гетероструктур на основе графена, обладающих перспективами для приборных применений. Таким образом **актуальность темы диссертации П.В. Ратникова несомненна**.

Новизна и достоверность полученных результатов. В диссертационной работе П.В. Ратниковым решен ряд важных теоретических задач, включая расчет коэффициентов пропускания электронов через барьеры из щелевой модификации графена, исследование спектра граничных состояний в гетероструктурах на основе графена, анализ дисперсии электронов и плазмонов в сверхрешетках на основе графена, изучение энергии связи экситона в графеновой квантовой яме.

Диссертация Ратникова состоит из введения, обзорной главы, посвященной моделям энергетического спектра графена, пяти глав, содержащих **новые и оригинальные научные** результаты, заключения, библиографии и двух приложений. Введение содержит обзор литературы по широкому кругу проблем, связанных с полупроводниковым гетероструктурами и мотивацию исследований, проведенных в диссертации.

В первой (обзорной) главе диссертационной работы приведены стандартные теоретические модели, используемые для описания энергетического спектра электронов в графене, включая приближение сильной связи и **kp**-метод. Обсуждается фаза Берри для электронов в графене, описывается метод учета внешнего магнитного поля в эффективном гамильтониане, а также приводится описание зонной структуры щелевой модификации графена в простейшей модели. Материал данной главы полезен для понимания оригинальных результатов, приведенных в последующих разделах диссертации.

Вторая глава диссертации П.В. Ратникова посвящена прохождению электронов в графене через потенциальные барьеры. Автор рассчитывает коэффициенты пропускания и отражения через барьер из щелевой модификации графена. Здесь же выполнен анализ условий, при которых барьер может выполнять роль «углового фильтра» для электронов, селективно пропуская носители с определенными углами падения на барьер. Выполнены

расчеты эффекта туннелирования электронов в двухбарьерных структурах и в структурах, где щель в спектре открыта благодаря внешнему магнитному полю.

В третьей главе диссертационной работы исследуются граничные состояния, возникающие вблизи границы между щелевой и бесщелевой модификациями графена. Используя простейшее условие сшивки волновых функций П.В. Ратников установил область существования граничных состояний и нашел их дисперсию. Последняя, в согласии с симметрийным анализом, зависит от долинного индекса электронов.

Глава 4 содержит результаты исследования электронных состояний в квантовых ямах (точнее говоря, полосках) на основе щелевых модификаций графена. Получены спектры размерно-квантованных состояний электронов и дырок, предсказано их долинное расщепление в асимметричных структурах, также исследованы граничные состояния в таких системах. В этой же главе выполнен расчет энергетического спектра экситона – электрон-дырочной пары, связанной кулоновским взаимодействием, и проанализировано влияние внешнего электрического поля на экситонные состояния.

Пятая глава диссертации Ратникова посвящена электронным свойства сверхрешеток на основе графена. В ней предложены различные реализации сверхрешеток, включая сверхрешетки с модуляцией ширины запрещенной зоны в щелевых модификациях графена и сверхрешетки с модуляцией скорости Ферми. Проанализированы также «политипные» сверхрешетки, основанные на чередовании щелевых и бесщелевых модификаций графена. Обсуждается энергетический спектр сверхрешеток и их вольт-амперные характеристики.

В главе 6 диссертации исследуются коллективные свойства электронов в сверхрешетке на основе графена, а именно, плазменные колебания. Методом функций Грина найдена дисперсия плазмонов в различного рода структурах на основе графена, обсуждается формирование плазмонных минизон. Теоретически изучен спектр магнитоплазмонов. Рассчитана эффективность поглощения электромагнитного излучения с частотой близкой к плазменной. Сказанное выше **подтверждает новизну результатов**, полученных в диссертационной работе П.В. Ратникова.

Достоверность полученных результатов и выводов сомнений не вызывает, из-за адекватного выбора теоретического формализма, внутренней непротиворечивости моделей и расчетов, сопоставления, где это было возможно, результатов исследований с расчетами, выполненными другими авторами в альтернативных моделях.

Научная и практическая значимость диссертации П.В. Ратникова несомненна. Детальные расчеты энергетического спектра гетероструктур на основе графена, спектра экситонов и плазменных возбуждений, анализ приграничных состояний открывает широкие перспективы для изучения физических явлений в таких системах, не выходя за рамки приближения эффективного гамильтониана и не прибегая к трудоемким микроскопическим расчетам. Предложенные П.В. Ратниковым модели гетероструктур могут найти свое применение при создании будущих приборов, в частности, микросхем, на основе графена.

По диссертационной работе П.В. Ратникова имеются следующие **замечания:**

1. Для сшивки волновых функциях на границах между графеновыми слоями Автор использует граничное условие (2.9) (стр. 39), которое требует сохранение на интерфейсе двухкомпонентного столбца, умноженного на корень из фермиевской скорости. По-видимому, это не единственное возможное условие, обеспечивающее сохранение потока, и отвечающее требованиям точечной симметрии интерфейса. Из диссертации неясно, сохранятся ли выводы для других граничных условий?
2. В главе 3 обсуждается возникновение состояния, локализованного на графеновом гетероконтакте. В частности, показано, что такое состояние может существовать лишь в определенном диапазоне волновых векторов k_y вдоль границы, например,

$0<|k_y|<k_{y1}$ (см. страницу 67 и далее). В диссертационной работе отсутствует физическая интерпретация волновых векторов «отсечки» (k_{y1}, k_{y2}, k_{y3}), которые задают области существования граничных состояний. Кроме того, вид граничного решения (3.7) предполагает вещественность показателей экспонент κ_1, κ_2, однако возможность существования эванесцентных решений (когда затухающая экпонента модулируется осциллирующей функцией) не анализируется.

3. При исследовании эффектов кулоновского взаимодействия в графеновых полосках эффективный потенциал выбирается в виде $\sim 1/|y|$, где y – расстояние между носителями заряда (формулы (4.15) и фурье-образ в (6.16)). Это выражение можно использовать при не слишком большом контрасте диэлектрических проницаемостей графена и окружающих материалов, см., например, [Л.В. Келдыш, *Кулоновское взаимодействие в тонких пленках полупроводников и полуметаллов*, Письма ЖЭТФ **29**, 716 (1979)]. В диссертации не обсуждаются ограничения на параметры структуры. Более того, в разд. 4.4 не приведены параметры структуры, для которой выполнен расчет энергии связи, поэтому неясно, применимы ли модельные предположения, сделанные при выводе формулы (4.28), описывающей энергию связи экситона.

Эти замечания, однако, носят, в значительной мере, формальный характер и являются, скорее, пожеланиями для дальнейшей работы. Они совершенно не умаляют общей высокой оценки работы П.В. Ратникова.

Диссертация Павла Вячеславовича Ратникова является завершенной научной работой, выполненной на высоком уровне. Материалы диссертации опубликованы в ведущих физических журналах (Письма в ЖЭТФ, ФТТ, ЖЭТФ, Physics of Wave Phenomena), докладывались автором на тематических конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

По моему мнению, диссертационная работа П.В. Ратникова «Электронные свойства планарных гетероструктур на основе графена» полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ратников Павел Вячеславович, безусловно **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
доктор физико-математических наук, профессор РАН
Глазов Михаил Михайлович
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.
Тел.: + 7 911 913 04 36
E-mail: glazov@coherent.ioffe.ru

Подпись М.М. Глазова удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ РАН,
доктор физико-математических наук, профессор
Шергин А.П.

«12» сентября 2016 года