

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель Центра  
физики наногетероструктур  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
физико-технического института  
им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук  
член-корреспондент РАН



П.С. Копьев  
абря 2015 г.

**Отзыв ведущей организации о диссертационной работе  
Загороднева Игоря Витальевича  
«Краевые электронные возбуждения в графене  
и 2D топологическом изоляторе на основе квантовых ям Cd(Hg)Te»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников**

**Актуальность темы диссертации.** В последние годы широким фронтом ведутся фундаментальные и прикладные исследования физических явлений в полупроводниковых системах с линейным энергетическим спектром носителей заряда. Подобная ситуация возникает в целом классе материалов и структур, где зона проводимости и валентная зона вырождены в какой-либо точке зоны Бриллюэна, а энергетические зазоры до других зон достаточно велики. При этом электронные состояния удается описывать в рамках уравнения Дирака или его модификаций, что позволяет моделировать релятивистские эффекты в твердом теле. Примерами такого рода систем служат графен – монослой атомов углерода, расположенных в гексагональной решетке, структуры с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe, системы на основе BiSb и др.

В этих системах заметную роль играют краевые эффекты, например, краевые состояния в двумерных структурах HgTe/CdHgTe, будучи нечувствительными к рассеянию на примесях, дефектах, обладают так называемой топологической защищенностью и во многом определяют транспортные свойства указанных систем. Однако никакое подробное теоретическое исследование краевых состояний не может быть осуществлено без четкой формулировки граничных условий, накладываемых на волновую функцию электрона. Диссертационная работа И.В. Загороднева посвящена теоретическому изучению моделей края для описания двумерных систем с линейным энергетическим спектром, выводу граничных условия, анализу краевых состояний и физических явлений, обусловленных краевыми состояниями. Таким образом **актуальность темы диссертации И.В. Загороднева несомненна.**

**Новизна и достоверность полученных результатов.** В своей диссертационной работе И.В. Загороднев предложил общее граничное условие для электронов в графене и

разработал теорию краевых (таммовских) состояний в этом материале. Также предложены граничные условия общего вида на одномерном крае структуры HgTe/CdHgTe. Загородневым проанализирован энергетический спектр графеновых наноструктур и влияние на него магнитного поля, а также исследованы проявления состояний, локализованных на краю графеновой антиточки, в транспортных свойствах такой системы. Для структур на основе двумерного топологического изолятора HgTe/CdHgTe построена теория длинноволновых «поверхностных» плазменных колебаний.

Диссертация Загороднева И.В. состоит из введения, обзора литературы, двух глав с **новыми и оригинальными научными** результатами, библиографии и двух приложений. Обзор литературы содержит достаточно адекватный анализ теоретических и экспериментальных работ по проблемам, связанным с краевыми состояниями в графене и топологических изоляторах, в нем обоснована постановка задач, решаемых в диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена проблеме граничных условий для эффективного гамильтониана, описывающего электроны в графене. В ней рассматриваются общие требования к феноменологическим граничным условиям, связанные с эрмитовостью задачи и симметрией к обращению хода времени. Если пренебрегать смешиванием электронных состояний в долинах  $K$  и  $K'$  на краю графена, то, как показано автором, граничное условие для двухкомпонентной волновой функции принимает особенно простой вид и содержит всего один феноменологический параметр.

Показано также, что для предложенного граничного условия на краю графена возникают локализованные состояния. Выполнен детальный анализ краевых состояний в модельных структурах на основе графена: полуплоскости, полосе, квантовой точке и антиточке. Далее в этой главе развивается теория краевых состояний в магнитном поле, направленном перпендикулярно слою графена. Найден энергетический спектр наноструктур на основе графена в магнитном поле, показано, что он включает в себя как «объемные» уровни Ландау, так и магнитные «таммовские» состояния. Дана интерпретация этих состояний в рамках квазиклассического приближения.

Диссертантом также рассчитано сечение рассеяния электронов на антиточке в графене. Оказалось, что оно в зависимости от энергии налетающего электрона имеет острые пики, связанные с рассеянием на квазистационарных краевых состояниях, причем величина сечения рассеяния многократно превышает «геометрическое» сечение антиточки. Этот результат является особенно важным, так как он демонстрирует, что в структурах с графеновыми антиточками рассеяние на краевых состояниях может играть основополагающую роль.

Автором приведен обзор и анализ недавних экспериментальных данных по магнитотранспортным измерениям на структурах с квантовыми антиточками, изготовленными из графена. Показано, что экспериментально наблюдаемые осцилляции сопротивления могут быть связаны с пересечением уровня Ферми электрона резонансными уровнями краевых состояний антиточки. Сопоставление теоретической модели с экспериментальными данными позволило получить оценку безразмерного параметра в граничном условии.

Во второй главе диссертации построена теория краевых возбуждений в наносистемах на основе двумерного топологического изолятора HgTe/CdHgTe. Предложено оригинальное граничное условие, описывающее поведение четырехкомпонентной волновой

функции на одномерной границе квантовой ямы HgTe/CdHgTe. Граничное условие, совместимое с общими требованиями сохранения потока на границе и инвариантностью к обращению времени, содержит шесть вещественных феноменологических параметров.

Проанализирован энергетический спектр полубесконечной системы с квантовой ямой HgTe/CdHgTe, найдены краевые состояния, и рассчитан их энергетический спектр. Продемонстрирована сильная чувствительность дисперсии краевых состояний к параметрам граничных условий, в частности, установлено, что их спектр может быть существенно нелинейным.

Также автором получен и проанализирован закон дисперсии длинноволновых плазменных колебаний краевых электронов в двумерной системе с дираковским спектром. Показано, что длинноволновые плазменные колебания в двумерном топологическом изоляторе могут быть описаны классическим законом дисперсии для одномерных плазмонов, при этом роль характерного размера системы играет четверть глубины локализации краевого состояния на уровне Ферми.

Сказанное выше **подтверждает новизну результатов**, полученных в диссертационной работе.

**Достоверность полученных результатов и выводов сомнений не вызывает** из-за адекватного выбора теоретического формализма, внутренней непротиворечивости моделей и расчетов, сопоставления результатов исследований с расчетами, выполненными другими авторами в альтернативных моделях, а также с результатами эксперимента.

**Научная и практическая значимость** работы также несомненна. Граничное условие общего вида, предложенное в диссертационной работе, позволит исследовать широкий круг физических явлений, обусловленных краевыми состояниями в графене и топологических изоляторах, не выходя за рамки приближения эффективного гамильтониана и не прибегая к трудоемким микроскопическим расчетам в методе сильной связи или псевдопотенциала. Расчет транспортного сечения в структурах с антидотками и спектров плазменных колебаний, выполненных диссертантом, открывает возможности для дальнейших экспериментальных исследований краевых состояний в двумерных системах. Полученные в работе результаты могут быть использованы при проведении исследований электронных, транспортных и оптических свойств графена и двумерных топологических изоляторов в организациях, занимающихся теоретическими и экспериментальными исследованиями этих систем, включая ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), ФИАН (Москва), ИТФ им. Л.Д. Ландау (Москва), ИФФТ (Москва), ИФП им. А.В. Ржанова (Новосибирск) и других.

По диссертационной работе И.В. Загороднева имеются следующие **замечания**:

1. В диссертации приведен достаточно подробный обзор литературы, посвященной проблематике граничных условий в системах с дираковскими фермионами. Его, однако, можно было бы дополнить кратким анализом известных работ Дьяконова и Хаецкого, Андо, Волкова и Тахтамирова, Ивченко и др. по граничным условиям в многозонных моделях полупроводников и выводу граничных условий из соображений симметрии.
2. При обсуждении общего вида граничных условий для электрона в графене, учитывающих смешивание состояний долин  $K$  и  $K'$  [формула (1.21)], отсутствует анализ

возможных ограничений на параметры матрицы  $g$ , накладываемых точечной симметрией края.

3. В диссертации не приведены оценки частот и волновых векторов «краевых» плазмонов в структурах на основе квантовых ям  $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ , а также критерии применимости выражения (2.45) для спектра плазмонов.

Эти замечания, однако, носят формальный характер и являются скорее пожеланиями для дальнейших исследований. Они не снижают высокой оценки работы И.В. Загороднева.

Диссертация Игоря Витальевича Загороднева является завершенной научной работой, выполненной на высоком научном уровне, и содержит решение задачи о краевых состояниях в графене и двумерных топологических изоляторах, имеющей важное значение для современной физики полупроводников. Материалы диссертации опубликованы в ведущих физических журналах (Письма в ЖЭТФ, ФНТ, Scientific Reports, Journal of Physics), докладывались автором на тематических конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа И.В. Загороднева «Краевые электронные возбуждения в графене и 2D топологическом изоляторе на основе квантовых ям  $\text{Cd}(\text{Hg})\text{Te}$ » полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Загороднев Игорь Витальевич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

#### **Отзыв составили**

Ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
доктор физ.-мат. наук,  
Глазов Михаил Михайлович  
Адрес: Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021  
Телефон: + 7 911 913 04 36  
E-mail: glazov@coherent.ioffe.ru

Главный научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
член-корреспондент РАН,  
доктор физ.-мат. наук, профессор,  
Ивченко Евгениус Левович  
Адрес: Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021  
Телефон: + 7 921 986 90 33  
E-mail: ivchenko@coherent.ioffe.ru

