

**Отзыв официального оппонента 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

Впервые еще в 1932 г. в классической работе И.Е.Тамма было обращено внимание на то, что обрыв кристалла (нарушение трансляционной инвариантности) может приводит к появлению специфических поверхностных (краевых) состояний, которые отсутствуют в систематике объемного спектра. Несколько позднее к такому же выводу, в рамках приближения сильной связи, пришел Шокли, рассматривая состояния на поверхности полупроводников. Долгое время данные состояния были скорее некоторой умозрительной теоретической конструкцией, чем реальным объектом экспериментального исследования. Систематическое и последовательное исследование электронной и атомной структуры поверхности началось в 80 годы, когда появились контролируемые методы приготовления и контроля качества поверхности в сверхвысоком вакууме. Пик этих исследований пришелся на 90 годы. Было понято, что появление или отсутствие поверхностных состояний неразрывно связано с атомной реконструкцией поверхности. Появление сканирующей туннельной микроскопии позволило визуализировать в

реальном пространстве атомную структуру поверхности, а появление метода эмиссионной спектроскопии с угловым разрешением позволило напрямую получать закон дисперсии поверхностных состояний. Возникло целое новое научное направление, именуемое физикой поверхности.

В это же время были предсказаны состояния на поверхности и на границах раздела полупроводников с безмассовым дираковским спектром. Однако внятное экспериментальное подтверждение наличия таких состояний отсутствовало.

Новый всплеск активности в этой области возник в последнее десятилетие в связи с появлением новых объектов исследования, таких как графен и других, и совершенствованием экспериментальных методик.

Диссертационная работа посвящена проблеме описания краевых электронных состояний и возбуждений в недавно открытых 2D электронных системах, таких как графен и 2D топологический изолятор. Хотя стоит отметить, что несмотря на популярность термина топологический изолятор и его частое использование, что понимать под этим объектом до сих пор является предметом дискуссий. Отличительной особенностью этих систем является то, что электроны в них имеют релятивистский спектр: бесщелевой в графене и с конечной массой в 2D топологическом изоляторе. Это приводит к тому, что краевые состояния в этих системах, как правило, имеют линейный, релятивистский закон дисперсии и могут вносить существенный вклад в низкоэнергетический отклик этих систем.

Обычно краевые состояния обсуждаются в рамках каких-то конкретных моделей, как-то модели сильной связи или DFT расчеты для какой-то конкретной микроструктуры края. В диссертационной работе И.В. Загороднева краевые состояния обсуждаются в наиболее общей постановке, так что конкретная микроструктура края не имеет прямого значения, хотя безусловно определяет используемые автором феноменологические параметры граничного условия.

Вышесказанное определяет **актуальность диссертационной работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, двух глав, списка литературы и двух приложений.

Во **введении** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, ее актуальность и положения, выносимые на защиту.

В **обзоре литературы** достаточно подробно изложены современные сведения о краевых состояниях в графене, некоторые сведения о 2D топологическом изоляторе на основе квантовых ям Cd(Hg)Te, представлено введение в проблему граничных условий для многозонной теории эффективной массы и приведены краткие сведения об 1D плазменных колебаниях.

Первая глава посвящена краевым состояниям в графене. В начале главы выводится общее граничное условие на краю образца, которым необходимо дополнить эффективный гамильтониан графена для описания образцов конечного размера. При выводе используются только общие физические соображения, такие как не протекание тока через границу (эрмитовость гамильтониана в ограниченной

области), симметрия по отношению к инверсии времени и слабость междолинных переходов для определенного класса границ. Используя выведенное граничное условие, анализируются (одночастичные) электронные спектры наноструктур различной геометрии (полуплоскость, полоса, квантовая точка и антиточка) с учетом краевых состояний. Автором показано, что спектр краевых состояний вблизи дираковской точки для графеновой полуплоскости всегда (для границ любого типа) представляет собой лучи, начинающиеся в центре проекций долин на направление края. Нанополосы графена могут, в зависимости от граничных условий, демонстрировать как металлическое, так и полупроводниковое поведение (при одинаковой ширине полосы). В магнитном поле краевые состояния гибридизуются с объемными уровнями Ландау, что особенно сильно проявляется для нулевого уровня Ландау. В антиточке это приводит к почти периодической зависимости уровней краевых состояний от магнитного потока, пронизывающего антиточку. Наконец, продемонстрировано, что в сечении рассеяния электронов на антиточке (без магнитного поля) проявляются резонансные пики, отвечающие рассеянию на квазистационарных уровнях краевых состояний.

Вторая глава посвящена электронным возбуждениям на краю 2D топологического изолятора на основе квантовых ям Cd(Hg)Te. Выведено общее ГУ для часто используемого эффективного двухзонного кр-гамильтониана (с учетом спина), описывающего квантовые ямы Cd(Hg)Te вблизи квантового топологического перехода. Показано, что использование пространственной симметрии также помогает

сократить количество феноменологических параметров в граничном условии. Проанализированы возможные спектры краевых состояний. Выявлено, что краевые состояния могут иметь существенно нелинейную дисперсию или вовсе отсутствовать вблизи центра зоны Бриллюэна. Рассмотрены плазменные колебания, возникающие в системе краевых электронов. Закон дисперсии таких колебаний имеет вид хорошо известных 1D плазменных колебаний, в котором роль характерного радиуса обрезания играет роль четверть глубины локализации краевых состояний на уровне Ферми.

Новизна полученных результатов несомненна. Их научная ценность заключается в том, что полученные теоретические результаты с успехом применены для объяснения ряда экспериментов.

При проведении расчётов автором использовались проверенные методы теоретической физики, воспроизводящие результаты в различных подходах; совпадением предсказанных эффектов с экспериментальными измерениями. Это дает основание считать полученные **результаты достаточно обоснованными и достоверными.**

В целом, работа производит весьма хорошее впечатление, несмотря на ряд допущенных автором опечаток и следующих замечаний:

1. На мой взгляд, использование термина “модельно независимые результаты..” может приводить к недоразумениям, поскольку, если буквально воспринимать этот термин, то можно думать, что результаты расчетов спектров никак не зависят от граничных условий. На самом деле это не так, поскольку

расчеты выполняются в приближении огибающей для волновой функции. Правильнее было бы говорить, что сами граничные условия для огибающей выводятся из наиболее общих требований, таких как эрмитовость и инвариантность к инверсии времени.

2. На мой взгляд, единственным безмодельным методом, позволяющим получить закон дисперсии поверхностных состояний, является симметричный анализ. Было бы полезно, произвести сравнение данных, полученных при симметричном анализе, с расчетами в диссертационной работе. Хотя, это скорее настоятельное пожелание для предмета дальнейших исследований.

Указанные недостатки не снижают ценности полученных научных результатов.

Заключение

Диссертационная работа И.В. Загороднева выполнена на высоком научном уровне. Результатом работы является решение важной задачи актуального направления в физике полупроводников. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие научное значение.

Диссертация написана доходчиво, грамотно и достаточно аккуратно оформлена. Результаты докладывались на большом количестве российских и международных конференций и научных семинарах. Число публикаций заметно превышает необходимый минимум требуемый формальными критериями для кандидатских диссертаций. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, а ее автор, Загороднев Игорь Витальевич, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 “физика полупроводников”.

12.01.2016

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Молотков Сергей Николаевич

Доктор физико-математических наук,

Заведующий лабораторией “Спектроскопии поверхности полупроводников”

Института физики твердого тела РАН,

Адрес: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д.2

Телефон: 8(496)52 219 82

E-mail: molotkov@issp.ac.ru

/С.Н. Молотков/

Подпись С.Н. Молоткова заверяю

Ученый секретарь ИФТТ РАН

Доктор физико-математических наук



/Г.Е.Абросимова/