

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Еналдиева Владимира Викторовича “СВОЙСТВА КРАЕВЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В ДИРАКОВСКИХ МАТЕРИАЛАХ”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Актуальность. Работа Еналдиева посвящена актуальной тематике - электронным состояниям в графене и топологических изоляторах, в которых носители заряда описываются бесщелевым или узкощелевым псевдорелятивистским законом дисперсии. Такая ситуация возникает, в частности, в ряде трехмерных и двумерных узкощелевых полупроводников и полуметаллов (халькогениды свинца и висмута, висмут, монослой дихалькогенидов переходных металлов), для которых велико спин-орбитальное взаимодействие. Дираковский спектр носителей способствует появлению зоны поверхностных (краевых) состояний, которые являются предметом исследования диссертации В.В. Еналдиева. Топологическая защищенность краевых и поверхностных состояний породила всплеск интереса к этой области, важной как с общенаучной, так и с практической стороны. Эти области являются в настоящее время самыми быстроразвивающимися тематиками, где происходит экспоненциальный рост числа публикаций. Таким образом актуальность темы диссертации В.В. Еналдиева несомненна.

Научная новизна и достоверность. Диссертация В.В. Еналдиева состоит из введения, обзора литературы, трех глав с новыми оригинальными результатами, библиографии и двух приложений. В Обзоре литературы содержится достаточно подробный анализ по теоретическим и экспериментальным вопросам, связанным с поверхностными состояниями в топологических изоляторах типа $\text{Bi}_2(\text{Se,Te})_3$, эффекту Ааронова-Бома в нанопроволоках из топологических изоляторов, а также описанию краевых состояний в графене и проявлению их в экспериментах. В качестве недостатка обзорной части отмечу отсутствие обзора по одной из тем диссертации -- двумерному топологическому изолятору и краевым состояниям в нем.

В первой главе диссертации исследуются спектры поверхностных состояний в полупроводниках типа $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x(\text{Se,Te})$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$. Показано, что на плоской поверхности поверхностные состояния имеют конический спектр, и, в зависимости от знака феноменологического параметра в граничном условии, лежат по энергии либо в запрещенной зоне либо на фоне одной из разрешенных зон. Здесь же рассмотрена задача о квантовании спектра массивных трехмерных дираковских фермионов в геометрии нанопроволоки и проанализирован вклад поверхностных состояний в её магнитопроводимость.

Во второй главе исследована проблема граничных условий и спектров поверхностных состояний в топологических изоляторах. Предложено общее граничное условие для огибающих функций в трехмерных топологических изоляторах типа $\text{Bi}_2(\text{Se,Te})_3$, которое на симметричной поверхности (111) описывается всего тремя действительными граничными параметрами. Проанализированы зависимости спектров

поверхностных состояний от значений параметров в найденном граничном условии. Показано, что в общем случае спектр поверхностных состояний не имеет стандартного конического вида. Напрямую проверено выполнение соответствия объем-граница в модели сильной связи для двумерного топологического изолятора. Автор активно использует симметричные и групповые методы для вывода гамильтонианов системы и общего вида граничных условий. Среди интересных новых результатов, полученных автором в этой главе, отмечу краевые состояния в двумерном топологическом изоляторе в модели сильной связи со смешанными граничными условиями (параграф 2.2).

Отмечу недостатки этого раздела работы. Казалось бы, что в таком подходе было нужно последовательно базироваться на атомной модели полубесконечного кристалла. Однако автор пользуется моделью огибающих (полученной в рамках модели сильной связи), которая дополняется произвольным граничным условием на поверхности. Эта непоследовательность подхода не дает связать граничное условие с параметрами исходной модели, и возможно, приводит к слишком большой свободе выбора параметров граничного условия. Кроме того, полученный спектр краевых состояний подробно не исследован ни аналитически, ни численно. В частности, остался неясным вопрос, как происходит смыкание краевого спектра с двумерными состояниями, тянется ли спектр до конца двумерных состояний, или имеется точка окончания спектра (рис. 2.3, красная и синяя линии). Другой некомментируемый результат - зеленая линия на том же графике, которая визуально касается границы двумерного спектра в ее экстремумах. Остается неясным, так ли это на самом деле. Помимо этого, не изучена степень линейности краевых состояний.

В третьей главе диссертации изучен вопрос о поглощении циркулярно поляризованного излучения в наноперфорированном графене. Присутствие квазистационарных краевых состояний вблизи каждого из нанотверстий в графене приводит к возникновению резонансного поглощения на частотах, отвечающих разности энергий ближайших уровней краевых состояний. Показано, что в условиях резонанса абсолютным значением поглощения можно управлять при помощи напряжения на затворе.

Все результаты опубликованы в уважаемых журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, Web of Knowledge. В том числе имеется по одной публикации в ЖЭТФ и Physical Review B и 3 статьи в Письмах в ЖЭТФ. Достоверность статей не вызывает сомнений. Работы многократно докладывались на международных научных конференциях.

Сказанное выше подтверждает **научную новизну результатов**, полученных в диссертации. В аналитических расчетах автор пользуется проверенными методами теоретической физики, поэтому **достоверность** полученных результатов не вызывает сомнения.

Научная и практическая значимость работы также несомненна. Наиболее важным результатом я считаю предложенные во второй главе граничные условия для огибающих функций, которые позволяют ставить и решать различные краевые задачи в ограниченных топологических изоляторах, в том числе, для подгонки под эксперимент.

Автор также впервые предсказал эффект Ааронова-Бома в магнитопроводимости нанопроволоки даже в той ситуации, когда энергии поверхностных состояний лежат вне запрещенной зоны. Кроме того, с практической точки зрения интересен результат, касающийся резонансного поглощения в наноперфорированном графене, который дает возможность использовать последний в качестве амплитудного модулятора терагерцового излучения. В качестве личного замечания укажу, что мы уже использовали в своей работе результаты одной из статей автора, включенных в диссертацию.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при проведении исследований транспортных и оптических свойств халькогенидов висмута и свинца, графена в организациях, занимающихся экспериментальным и теоретическим исследованием этих систем, включая ФИАН, ИФП СО РАН (Новосибирск), ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), ИФТГ РАН (Москва), ИТФ им. Ландау РАН (Москва) и др.

Диссертационная работа В.В. Еналдиева является законченным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты. Отмеченные недостатки не являются критическими в общей высокой оценке диссертации. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. В.В. Еналдиев безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.10 - физика полупроводников.**

Д.ф.-м.н., г.н.с.

М.В. Энтин

Подпись



Ученый секретарь
ИФП СО РАН
С.А. Аржанникова

12.04.2017

Личные данные оппонента

Энтин Матвей Вульфович

уч. степень: д.ф.-м.н.; уч. звание: ст. науч. сотрудник

должность: г.н.с. Лаборатории теории твердого тела Институт физики полупроводников
СО РАН им. А.В. Ржанова

диссертация на степень д.ф.-м.н. по специальности 01.04.10 - физика полупроводников;
адрес: 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 13, Институт физики полупроводников СО
РАН им. А.В. Ржанова;

e-mail: entin@isp.nsc.ru

телефон +79137280533

Ученый секретарь
ИФП СО РАН
С.А. Аржанникова



Матвей

[Handwritten signature]

12.04.2017