

125009, г. Москва,
ул. Моховая, д. 11, корп. 7,
ФГБУН Институт Радиотехники и
Электроники им. В. А. Котельникова
Российской Академии Наук
Диссертационный совет Д002.231.01

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 (специальность 01.04.10 - физика полупроводников).

Актуальность. В последние 10 лет в физике происходит бурное развитие, связанное с появлением новых интересных двумерных и трёхмерных материалов, в том числе графена, дисульфида молибдена, двумерных и трёхмерных топологических изоляторов. С точки зрения физики полупроводников эти материалы представляют собой узкозонные или бесщелевые полупроводники. Поэтому их теоретическое исследование можно проводить хорошо отработанными методами из теории полупроводников. В диссертации представлены результаты теоретического анализа ряда фундаментальных задач, относящихся к описанию электронных свойств квазичастиц с дираковским спектром в двумерных и трёхмерных материалах. В первой главе диссертации представлен анализ спектра поверхностных состояний в полупроводниках типа $Pb_{1-x}Sn_x(Se,Te)$ и $Bi_{1-x}Sb_x$. Интерес к этим соединениям связан с тем, что их объемный квазичастичный спектр имеет дираковский вид. Также в первой главе обсуждается магнитопробитость проволоки из таких соединений. Полученные результаты являются безусловно актуальными, т.к. они важны для понимания механизмов поверхностной проводимости в бесщелевых полупроводниках с объемным дираковским спектром. Во второй главе изучаются поверхностные состояния в трёхмерных и двумерных топологических изоляторах. В частности детально изучено как зависит спектр поверхностных (краевых) состояний от параметров, которые определяют эффективное граничное условие. Оказывается, что при некоторых значениях этих параметров спектр поверхностных (краевых) состояний может сильно отличаться от простейшей ситуации, когда точка Дирака располагается в Γ -точке. Полученные результаты особенно актуальны в свете теоретического обсуждения соответствия объем-граница в топологических изоляторах. В третьей главе диссертации изучается поглощение циркулярно поляризованного излучения

графеном с наноперфорированными отверстиями. Показано, что у границы отверстий возникают квазистационарные состояния, которые могут приводить к резонансному поглощению излучения. Актуальность полученных результатов связана с тем, что наноперфорированный графен интенсивно изучается экспериментально. Таким образом, актуальность работы не вызывает сомнения.

Новизна и достоверность. В диссертационной работе впервые получен ряд принципиально важных новых результатов, имеющих как фундаментальное, так и прикладное значение. Впервые найдены электронные спектры и вычислена магнитопроводимость нанопроволоки, описываемой эффективным изотропным трехмерным уравнением Дирака с однопараметрическим граничным условием, удовлетворяющим требованиям эрмитовости и симметрии инверсии времени задачи. Впервые выведено граничное условие для огибающих функций в трёхмерном топологическом изоляторе типа $\text{Bi}_2(\text{Se,Te})_3$. Показано, что в общем случае поверхностные состояния не имеют конической дисперсии. В рамках модели сильной связи с четырьмя орбиталями на каждом узле квадратной решетки показано, что общее инвариантное относительно инверсии времени граничное условие не нарушает соответствие "объем- граница" в двумерных топологических изоляторах. Предсказано, что квазистационарные состояния, возникающие у границы отверстий в графене, могут приводить к резонансному поглощению циркулярно поляризованного излучения. Эти результаты, а также другие результаты диссертации, являются оригинальными и получены автором впервые. Этим определяется **научная новизна** работы. Автор проводит аналитические расчеты, используя проверенные методы теоретической физики, такие как метод огибающей (к-р метод), нестационарная теория возмущений, и др. Поэтому не возникает сомнений в **достоверности** полученных результатов.

Научная и практическая значимость Научная значимость диссертации состоит в ряде новых фундаментальных результатов, полученных впервые. Наиболее интересны два из результатов диссертации: прямая проверка соответствия объем-граница и оригинальный метод вычисления резонансного поглощения излучения на отверстиях в графене. С практической точки зрения интересен последний результат, который показывает, что наноперфорированный графен может быть использован как модулятор терагерцового излучения.

Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что научная и практическая значимость всех результатов диссертации высока и несомненна.

Развитые в диссертации оригинальные теоретические методы и подходы могут быть использованы для количественного описания разнообразных явлений в двумерных и трёхмерных топологических изоляторах и в графене. Результаты диссертации В.В. Еналдиева могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики полупроводников и физики конденсированных сред (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИС РАН, НЦ КИ ПИЯФ, МГУ, ИФП СО РАН, ФИАН, ИФТТ РАН, ИТФ РАН, и др.).

Диссертация В.В. Еналдиева написана понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций. В ней четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны и проанализированы использованные теоретические методы и обсуждены полученные результаты.

Замечания. По диссертации следует высказать несколько вопросов и замечаний, не имеющих принципиального характера:

- В разделе 1.3 выводится спектр поверхностных состояний в нанопроволоке, исходя из объемного гамильтониана. Для случая положительного параметра a в граничных условиях спектр состояний лежит внутри объемной щели. Было бы полезно для понимания выписать поверхностный гамильтониан, который приводит к таким же поверхностным уровням и проследить как от параметра a зависят параметры гамильтониана для поверхностных состояний.
- Какая из симметрий в ур. (2.5) гарантирует наличие нулевых элементов в недиагональных блоках матрицы Q в ур. (2.6)? Какой вид будет иметь матрица Q при наличии только симметрии относительно обращения времени?
- В главе 3 представлен оригинальный расчет поглощения наноперфорированного графена. Наиболее интересный результат получается в условиях резонанса (ур. 3.19). Было бы полезно получить этот результат, с использованием стандартного расчета проводимости на конечной частоте с использованием аппарата функций Грина.
- В разделе 2.2 изучаются краевые состояния в двумерном топологическом изоляторе в модели сильной связи. Оказывается, что в зависимости от параметров, характеризующих граничное условие, краевое состояние может иметь достаточно

сложную дисперсию. Позволяет ли используемый в диссертации подход изучить как устроены краевые состояния в ситуации, когда прямая щель в Г-точке осталась, но максимум валентной зоны лежит выше чем минимум зоны проводимости? Если да, то что можно ожидать для поведения краевого состояния в этой ситуации?

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне.

Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 5 научных работах в отечественных (Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ) и зарубежных журналах (Phys. Rev. B), доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа В.В. Еналдиева является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение новой научной задачи о свойствах поверхностных и краевых состояний в полупроводниках с дираковским спектром. Решение этой задачи является важным этапом в развитии современной физики полупроводников. 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**.

доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.02 - теоретическая физика
старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау
Российской академии наук
Бурмистров Игорь Сергеевич
31 марта 2017 г.
142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А
тел. 8 495 7029317, e-mail: burmi@itp.ac.ru

Подпись И.С. Бурмистрова заверяю
ученый секретарь
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
к.х.н. С.А. Крашаков

