

УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук


_____ академик РАН А.В. Латышев

4 сентября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Дурнева Михаила Васильевича
«Электронные состояния и нелинейный транспорт в двумерных дираковских
материалах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Изучение транспортных и оптических свойств современных моноатомных двумерных систем являются активно развиваемым направлением исследований в современной физике полупроводниковых систем пониженной размерности. Особый интерес представляют системы с непараболическим законом дисперсии носителей заряда, такими как графен, монослои дихалькогенидов переходных металлов, поверхностные двумерные проводящие каналы топологических изоляторов и ряд других. В современной литературе за такими структурами и материалами закрепилось общее название двумерных дираковских систем. Транспортные и оптические свойства двумерных дираковских материалов определяются структурой волновых функций и энергетического спектра объёмных и краевых состояний носителей заряда. Решающее влияние на структуру энергетических состояний носителей заряда оказывает кристаллическое строение рассматриваемых систем, а также внешние электрические и магнитные поля. Понижение симметрии сопровождается модификацией структуры энергетических состояний носителей заряда, что существенно сказывается на особенностях взаимодействия носителей заряда с электромагнитными полями и может приводить к качественно новым физическим эффектам. Большое разнообразие материалов и различных физических воздействий ставит перед теорией задачу детального описания энергетического спектра, оптических и транспортных свойств таких материалов. Теоретическому исследованию этих вопросов посвящена диссертационная работа М.В. Дурнева, что и определяет ее **актуальность**. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** дано теоретическое описание тонкой структуры двумерного спектра и краевых состояний носителей заряда в квантовых ямах на основе HgTe квантовых ям. Показано, что количество и положение точек Вейля в электронном спектре квантовых ям HgTe/CdHgTe вблизи топологического перехода определяется кристаллографической ориентацией и профилем потенциала квантовой ямы. Здесь же изучено строение спектра в присутствии магнитного поля. В частности, дано предсказание существования анизотропии эффекта Зеемана в топологических изоляторах на основе HgTe квантовых ям.

Вторая глава посвящена построению теории оптических переходов на краевых проводящих каналах двумерных топологических изоляторов. Строится теория фотогальванического эффекта и эффекта фотонного увлечения электронов краевых состояний топологического изолятора на переходах «краевое состояние – краевое состояние» и «краевое состояние – объёмное состояние». В начале главы излагается феноменологическая теория, основанная на теории симметрии, далее излагается микроскопический теоретический анализ указанных эффектов. Поскольку переходы с краевых состояний должны иметь место с переворотом спина, всегда ожидалось, что ключевым микроскопически механизмом таких переходов является магнитодипольный переход. В настоящей главе показана возможность существования электрических дипольных переходов – более мощного механизма, нежели магнитодипольный переход.

Третья глава посвящена теоретическому анализу зонного спектра и фотоиндуцированного транспорта в двумерных мономолекулярных слоях дихалькогенидов переходных металлов. Разработана 6-зонная **к.р** модель зонного спектра указанных материалов и численным анализом определены его параметры. Представлена теория краевого фотоиндуцированного транспорта в монослоях дихалькогенидов переходных металлов, обусловленных межзонными оптическими переходами.

Четвертая глава посвящена теоретическому анализу краевых фототоков в частотной области, соответствующей внутризонным переходам. Обсуждается генерация стационарных фототоков и эффект генерации второй гармоники вблизи края образца.

В **пятой главе** разработана теория фотопроводимости двумерного электронного газа при внутризонном поглощении внешнего электромагнитного излучения. Обсуждается возможность и условия существования фотовольтаического эффекта Холла в системах с параболическим и линейным спектром носителей заряда. В постановке «накачка-зондирование» разработана теория эффекта Фарадея.

Можно выделить следующие **значимые результаты** работы:

1. Симметричный анализ возможных типов спектра краевых и «объёмных» состояний двумерных топологических изоляторов.
2. Предсказание возможности существования электрического дипольного перехода как механизма фотоиндуцированного транспорта на краевых состояниях топологических изоляторов.

3. Детальный анализ влияния нарушения трансляционной симметрии – границы двумерного образца – на нелинейный фотоиндуцированный транспорт, в частности, индуцированный границей эффект генерации второй гармоники.
4. Предсказание фотоиндуцированного эффекта Фарадея в подходе «накачка-зондирование».
5. Несомненным достоинством диссертационной работы является подтверждение полученных в диссертационной работе теоретических результатов имеющимися экспериментами.

Непринципиальные **критические замечания** по диссертации сводятся к следующим.

1. При рассмотрении краевых фототоков член, описывающий генерацию носителей, записан в виде, соответствующем бесконечному образцу. Следовало бы дать пояснения, почему можно пренебречь влиянием края образца на процессы генерации.
2. При исследовании переходов «край-зона» учитывается время релаксации импульса и пренебрегается процессами рекомбинации. Казалось бы, что для установления стационарного режима учет времени рекомбинации принципиален. Следовало бы дать обоснования, позволяющие пренебречь процессами рекомбинации.
3. Под рисунком 3.4 сказано, что ток вдали от края – в объеме системы – равен нулю вследствие чётности функции распределения фоторожденных носителей. С другой стороны, выражение для интегрального фототока (при зеркальном отражении от края) определяется функцией распределения в объеме. Нет ли здесь противоречия?
4. Интегральное выражение для краевого фототока (формула 4.10) определяется лишь характеристиками объема (например, объемной концентрацией носителей), и не содержит никакой информации о крае образца. Хотелось бы иметь качественные пояснения, почему информация о крае образца «выпадает» из финальной формулы для краевого фототока.

Сделанные замечания не изменяют общую положительную оценку работы и не снижают ее научной ценности.

В целом, диссертация М.В. Дурнева является самостоятельным завершённым оригинальным научным исследованием, **достоверность результатов и обоснованность выводов** которого не вызывают сомнений. **Достоверность** полученных результатов основывается на надежности и обоснованности применяемых теоретических методов и подходов. Полученные в диссертации теоретические результаты являются новыми. Были даны новые предсказания для проведения экспериментальных исследований фотоиндуцированных транспортных явлений в низкоразмерных системах, а также представлено сравнение полученных автором теоретических результатов с результатами экспериментальных

исследований, что является, несомненно, **значимым практическим результатом** диссертационной работы.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых журналах из списка Web of Science и Scopus, включая журналы первого квартала. Результаты работы докладывались на престижных российских и международных семинарах и конференциях. Полученные в диссертации результаты соответствуют специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Доклад М.В. Дурнева по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН на базе лаборатории теоретической физики 19 февраля 2025 г.

Отзыв на диссертационную работу М.В. Дурнева одобрен ученым советом ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, протокол № 2 от 03.03 2025 г.

Диссертационная работа М.В. Дурнева «Электронные состояния и нелинейный транспорт в двумерных дираковских материалах» в полной мере соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, а ее автор, Михаил Васильевич Дурнев, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

/В.М. Ковалёв/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), Россия, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13, тел.(383)330-9-55, факс 8(383)333-27-71, <http://www.isp.nsc.ru/>; IFP@isp.nsc.ru.

Подпись д.ф.-м.н., в.н.с., и.о. заведующего лабораторией теоретической физики ИФП СО РАН В.М. Ковалёва удостоверяю.

Ученый секретарь ИФП СО РАН, к.ф.-м.н. 

/С.А. Аржанникова/