

194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Диссертационный совет ФТИ 34.01.02

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Дурнева Михаила Васильевича “Электронные состояния и нелинейный транспорт в двумерных дираковских материалах”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 1.3.11 - физика полупроводников).

Актуальность. Появление новых двумерных материалов с линейным спектром в объеме или на краю (в случае топологических изоляторов), открыло возможность к изучению классических явлений физики полупроводников в необычных условиях. К такой группе явлений безусловно относятся фотогальванические явления, изучению которых в значительной мере посвящена представленная диссертация. Диссертационная работа посвящена исследованию электронных состояний и связанных с ними фотогальванических и нелинейных эффектов в таких необычных двумерных материалах и поэтому актуальность исследований не вызывает сомнений. Дополнительную актуальность диссертационной работе придает тот факт, что часть теоретических результатов нашла экспериментальное подтверждение.

Структура диссертации и основные результаты. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во введении обсуждается актуальность работы и ее цель, приводится список основных результатов. В первой главе обсуждаются результаты тонкой структуры электронных состояний в квантовых ямах HgTe/CdHgTe. Во второй главе развивается теория фотогальванических эффектов в краевых каналах двумерных топологических изоляторов. В третьей главе диссертации приведены результаты для фотогальванических эффектов при межзонных переходах в двумерных кристаллах. В четвертой главе обсуждаются нелинейные эффекты на краю двумерных проводящих систем. В пятой главе строится теория фотоиндуцированных эффектов Холла и Фарадея в двумерном электронном газе. Среди основных результатов диссертации (они приведены во введении к диссертации) я бы выделил три наиболее интересных на мой взгляд:

- 1) сильная анизотропия эффекта Зеемана для краевых состояний двумерных топологических изоляторов на основе квантовой ямы HgTe/CdHgTe;
- 2) оптические переходы в электрическом дипольном приближении между спиновыми ветвями краевых состояний двумерных топологических изоляторов без центра инверсии;
- 3) результат о том, что накачка двумерного электронного газа циркулярно поляризованным терагерцовым излучением приводит к вращению плоскости линейной поляризации зондирующего луча из-за фотоиндуцированной недиагональной компоненты тензора электронной проводимости.

Новизна и достоверность. В диссертации подробно изучены электронные состояния и связанных с ними фотогальванические и нелинейные эффекты в двумерных дираковских материалах, получены новые оригинальные результаты, имеющих как фундаментальное, так и возможно в будущем прикладное значение. Все результаты диссертации, являются оригинальными и получены автором впервые. Этим определяется научная новизна работы. Автор проводит аналитические расчеты, используя такие проверенные методы теоретической физики, как метод эффективного гамильтониана, кинетическое уравнение и др. Ряд результатов автора согласуется с экспериментом.

Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались автором на российских и международных конференциях. Они хорошо известны научному сообществу. Поэтому не возникает сомнений в достоверности полученных результатов.

Научная и практическая значимость. В диссертации содержатся новые теоретические результаты для электронных состояний и связанных с ними фотогальванических и нелинейных эффектах в двумерных дираковских материалах. На мой взгляд, перечисленных выше трёх результатов уже достаточно, чтобы с уверенностью констатировать **высокую и несомненную научную значимость** диссертационной работы. Дополнительно хочется отметить, что при чтении диссертации видна практическая направленность проводимых теоретических исследований. Это позволяет с уверенностью сказать, что и **практическая значимость всех результатов диссертации высока и несомненна.**

Результаты диссертации М.В. Дурнева могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих теоретические и экспериментальные исследования в области физики полупроводников, двумерных систем и наноструктур (ИРЭ РАН, ИС РАН, НЦ КИ ПИЯФ, МГУ, ФИАН, ИФП СО РАН, ИФТТ РАН, и др.).

Диссертация М.В. Дурнева 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 общих замечаний и частых вопросов, не имеющих принципиального характера:

1. В первой главе приведены интересные ответы для спектра краевых состояний без и в магнитном поле в квантовой яме $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с учетом структурной асимметрии. Однако, эти результаты не применяются для вычисления физических характеристик, например, тока, который переносится краевыми состояниями. Например, правильно ли ожидать, что в условиях открытия щели в спектре краевых состояний магнитным полем (формула 1.47), кондактанс при низких температурах станет экспоненциально малым.
2. Формула 2.14 — золотое правило Ферми, работает, строго говоря, для бесконечно-длинного края. В тоже время в реальных структурах края конечны. Было полезно написать условие на длину краевого канала, когда эта оценка работает.
3. Во второй главе было бы полезно обсудить какие физические механизмы приводят к энергетической зависимости τ_{edge} . Если имеется в виду межэлектронное взаимодействие, то соответствующие времена большие и могут иметь заметную зависимость от энергии.
4. Для двумерных электронных систем в магнитном поле известно, что важно учитывать межэлектронное взаимодействие, что приводит, например, к появлению коллективного возбуждения на краю системы: краевого магнетоплазмона. В связи с этим в Главе 3 было бы полезно прокомментировать потенциальное влияние межэлектронного взаимодействия на краевой фототок.
5. Было бы полезно сравнить ур. 4.14 с выражениями для сдвиговой и холловской вязкостей, в которую тоже входит τ_2 и удвоенная циклотронная частота. Почему в вязкости есть резонанс на частоте равной удвоенной циклотронов частоте, а в фототоке 4.14 такого резонанса нет?
6. Обычно, когда решается задача про учет экранирования поля на краю двумерной системы (например, в задаче про краевой магнетоплазмон), для решения интегро-дифференциального

уравнения используется метод Винера-Хопфа. Не очень понятно, почему в главе 4 при рассмотрении задачи про фототок удается обойтись без этого метода.

7. Можно было бы ожидать, что в третьем порядке по электрическому полю поправка к функции распределения будет определяться временем τ_3 . Однако ответ для холловской проводимости (глава 5) содержит только времена τ_0 и τ_1 . Было бы полезно прокомментировать причину этого.

Представленные выше замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на научном уровне, соответствующем уровню доктора наук.

Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 18-ти научных работах в отечественных (ФТТ,ЖЭТФ) и зарубежных журналах (Phys. Rev. Lett., 2D Materials, Phys. Rev. B), доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа М.В. Дурнева является законченным и оригинальным исследованием, содержит принципиально важные новые теоретические результаты. На основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым диссертационными советами ФТИ им. А.Ф. Иоффе к докторским диссертациям. М.В. Дурнев безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **1.3.11 - физика полупроводников**.

доктор физико-математических наук, профессор РАН,
специальность 01.04.02 - теоретическая физика
заместитель директора

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук
Бурмистров Игорь Сергеевич

28 февраля 2025 г.

142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А
тел. 8 495 7029317, e-mail: burmi@itp.ac.ru

Согласен на обработку персональных данных
И.С. Бурмистров

Подпись И.С. Бурмистрова завер
ученый секретарь
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
канд. хим. наук С.А. Крашаков

