



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

В диссертационный совет
ФТИ 34.01.02
при ФТИ им. А.Ф. Иоффе
194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26

**Отзыв
официального оппонента**

о диссертационной работе Дурнева Михаила Васильевича "Электронные состояния и нелинейный транспорт в двумерных дираковских материалах", представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников

Актуальность. Экспериментальные и теоретические исследования систем, проявляющих свойства топологических изоляторов, были начаты относительно недавно. Топологические изоляторы интересны не только с фундаментальной точки зрения, но и как основа для новых приборов опто- и наноэлектроники. В связи с этим интерес к их изучению очень велик, число научных работ и публикаций по этой тематике непрерывно растет. Увеличение числа экспериментальных работ по дираковским материалам однозначно связано с успехами технологии. В первую очередь следует отметить успехи в выращивании высококачественных квантовых ям в системе кадмий-ртуть-теллур. Подбором параметров данной системы можно легко осуществлять переход от нормальной зонной структуры к инвертированной, что и позволяет наблюдать проводящие краевые состояния. Появляющиеся экспериментальные результаты требуют развития соответствующих теоретических моделей, чему и посвящена работа М. Дурнева. Ее значительная часть посвящена теоретическому исследованию тонкой структуры электронных состояний и фотогальванических эффектов в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$. Другими яркими представителями дираковских материалов являются графен и тонкие слои дихалькогенидов переходных металлов, которые также являются объектами исследований настоящей работы. Настоящая работа восполняет пробелы в области исследования электронных состояний и нелинейных транспортных и оптических эффектов в двумерных дираковских материалах, в связи с этим тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной, а сама работа представляется необходимой и своевременной.

Новизна и достоверность результатов. В работе получен ряд новых научных результатов. Укажем лишь некоторые из них, по нашему мнению, наиболее важные и интересные.

Результаты работы изложены в диссертации, основная часть которой состоит из пяти глав. Основным результатом **первой главы** является микроскопическая теория тонкой структуры дираковских состояний в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с

учётом различных типов асимметрии: интерфейсной, объёмной и структурной. В частности, в работе определено их влияние на положение вейлевских точек в спектре. Следует отметить, что наряду со структурами «стандартной» кристаллографической ориентации (001) рассмотрены структуры, выращенные на подложке (013), которые наиболее интересны для практических применений. Изучены спиральные краевые состояния в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с сильной естественной инверсионной асимметрией, в том числе в ненулевом магнитном поле.

Вторая глава посвящена фотогальваническим эффектам, связанным с краевыми состояниями в топологических изоляторах на квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$. Построена теория краевого фотогальванического эффекта и эффекта фотонного увлечения при прямых оптических переходах с переворотом спина в спиральном краевом канале, а также в условиях фотоионизации. Выполнен анализ данных эксперимента по краевому фотогальваническому эффекту в режиме квантового эффекта Холла.

В работе также исследованы дираковские состояния в таких интенсивно исследуемых сейчас двумерных материалах, как уже упомянутые квантовые ямы $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с шириной, близкой к критической, графен и монослой дихалькогенидов переходных металлов. В **третьей главе** построена многозонная кр-модель электронных состояний в монослоях дихалькогенидов переходных металлов и исследованы краевые фототоки, возникающие в двумерных дираковских материалах при межзонных оптических переходах и связанные с особенностями рассеяния на краю структуры.

Четвертая глава посвящена исследованию нелинейных краевых эффектов в двумерных системах со свободными носителями заряда в условиях их взаимодействия с электромагнитным излучением. Разработана теория краевых фототоков в двумерном электронном газе, которая использована для анализа имеющихся экспериментальных данных для двуслойного графена. Предсказан циклотронный резонанс в краевом токе, который затем был обнаружен на эксперименте. Была построена микроскопическая теория краевого эффекта генерации второй гармоники при освещении края двумерного газа терагерцовым излучением.

В заключительной **пятой главе** диссертации продолжено описание нелинейных оптических явлений. Разработана теория фотоиндуцированных эффектов Холла и Фарадея на свободных электронах в двумерном электронном газе на примере однослойного, двуслойного и свободно подвешенного графена.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Используются современные вычислительные методы. Результаты расчетов, полученные в работе, хорошо согласуются с результатами экспериментов в тех случаях, когда такие экспериментальные результаты имеются. Необходимо отметить тесное и плодотворное взаимодействие автора работы с ведущими экспериментальными группами мирового уровня. Примерами могут служить исследования краевого фотогальванического эффекта в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ и краевых фототоков в графене, выполненные совместно с группой С. Ганичева из университета Регенсбурга.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она частично отражена в предыдущих разделах отзыва. Следует отметить фундаментальный характер разработанных автором теоретических подходов. В работе построена теория различных явлений в двумерных дираковских материалах и на этой основе выполнены расчеты основных характеристик наблюдаемых эффектов. В работе описаны краевые фототоки в топологических изоляторах, возникающие при освещении структур и имеющие различную природу, которые можно отделить от объемных фототоков, что позволяет изучать процессы релаксации энергии, импульса и спина краевых состояний.

Замечания и вопросы.

1. Зависимости циркулярного и линейного краевых фототоков в квантовых ямах HgTe/CdHgTe от энергии фотона $\hbar\omega$ приведены на рис. 2.4. Можно ли пояснить, почему именно для циркулярной поляризации света различие численного и приближенного расчётов для большой энергии кванта более существенно?

2. При расчёте параметров эффективного гамильтониана в структурах HgTe/CdHgTe использовано электрическое поле $E_z = 15$ кВ/см. Из каких соображений выбрано это значение?

3. Эксперименты по циркулярным фототокам в структурах с квантовой ямой HgTe/CdHgTe, выполненные в терагерцовом спектральном диапазоне, сравниваются с расчетом в рамках прямых переходов электронов под действием излучения. Не следовало ли для такого довольно длинноволнового излучения учесть не прямые переходы с участием рассеяния электрона на примесях/фононах?

4. В главе 3 диссертации развита многозонная *kp*-модель для описания электронных состояний в монослоях дихалькогенидов переходных металлов. Каким образом эта модель учитывает отсутствие центра инверсии в этих материалах?

5. В главе 4 диссертации приведены аналитические выражения для краевого фототока при зеркальном отражении электронов от края. Как изменятся полученные результаты, если рассеяние будет диффузным?

6. Почему для электронного газа с параболическим законом дисперсии поперечная фотопроводимость, рассчитанная в главе 5, равна нулю для короткодействующих рассеивателей? Будет ли это так же для газа с линейным законом дисперсии?

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, большой объем проведенных исследований, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Несомненно, эта работа открывает новые перспективы дальнейшего исследования электронных состояний, а также

транспортных и оптических явлений в двумерных дираковских материалах. Совокупность опубликованных работ автора представляет собой крупное достижение в области физики полупроводников и наноструктур, имеющее большое научное и прикладное значение. Важным достоинством работы является то, что ряд результатов теоретических исследований, полученных в ней, подтверждается экспериментальными работами других авторов. Диссертация написана ясным языком, имеет четкую структуру, основные результаты четко сформулированы.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации. Результаты работы опубликованы в ведущих мировых научных журналах.

Таким образом, диссертация Дурнева Михаила Васильевича полностью удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым диссертационными советами ФТИ им. А.Ф. Иоффе к докторским диссертациям, а он сам, несомненно, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

Профессор Высшей инженерно-физической школы
Института электроники и телекоммуникаций,
профессор, доктор физ.-мат. наук,
специальность 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков

Дмитрий Анатольевич Фирсов

E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru

Тел.: +7-921-798-8231

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 29

14.03.2025