

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Прудкогляд Валерий Андреевич

**Свойства электронного транспорта в топологических
материалах на основе HgTe и Bi₂Se₃**

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Физическом Институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Пудалов Владимир Моисеевич (ФИАН)

Официальные оппоненты:

Зайцев-Зотов Сергей Владимирович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Феде-
рального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ра-
диотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

Тейтельбаум Григорий Бенционович

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотруд-
ник Лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники Казанского
физико-технического института им. Е.К. Завойского, обособленного струк-
турного подразделения Федерального государственного бюджетного учре-
ждения науки «Федеральный исследовательский центр “Казанский науч-
ный центр Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт фи-
зики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН»

Защита состоится «21» марта 2022 года в 10:00 на заседании диссертационного
совета 24.1.262.01 на базе Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по
адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте
института <http://www.lebedev.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.262.01,

доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Проявления релятивистских эффектов в электронных свойствах кристаллических материалов привлекают внимание исследователей начиная еще с середины XX века. Особенно значимым влияние этих эффектов оказывается в узкозонных и бесщелевых полупроводниках. Релятивистские поправки к атомным потенциалам и, в особенности, поправка, связанная со спин-орбитальным взаимодействием, приводят к тому, что в некоторых бесщелевых полупроводниках порядок следования энергетических зон, классифицированных по симметрии электронных состояний, становится инвертированным по отношению к “обычным” полупроводникам. Также в таких материалах значительное влияние на спектр, транспортные и оптические свойства начинают оказывать эффекты электрон-электронного взаимодействия вблизи точки касания валентной зоны и зоны проводимости. Изначально наибольшее внимание привлекли к себе такие материалы как HgTe и HgSe. В серии пионерских работ [1–3] было также показано, что на интерфейсе между материалами с инвертированным и прямым порядком следования энергетических зон должны наблюдаться бесщелевые проводящие состояния, существование которых нечувствительно к деталям устройства поверхности раздела. В частности, существование интерфейсных состояний с дираковским спектром было установлено для материалов $Pb_{1-x}Sn_xTe(Se)$ и $Cd_xHg_{1-x}Te$. Фундаментальное значение этих работ, однако, было осознано исследователями значительно позже в связи с более глубоким пониманием роли топологии электронного спектра в материалах с инвертированным спектром, а также с внедрением в физику конденсированного состояния математических методов топологии.

Описание некоторых аспектов физики конденсированных сред на языке топологии началось с работ Костерлица, Таулеса и др. [4, 5]. Топологический подход оказался весьма продуктивным при описании физики целочисленного квантового эффекта Холла. В середине 2000-х годов в ряде теоретических ра-

бот на основе топологических аргументов была предсказана возможность реализации топологически защищенных бесщелевых проводящих состояний с дираковским спектром. При этом было выделено несколько классов топологических систем, часть из которых являются двумерными с одномерными краевыми состояниями, а часть – трехмерными с двумерными поверхностными проводящими состояниями. Для этих состояний был предсказан квантовый спиновый эффект Холла. Первое экспериментальное подтверждение теоретических предсказаний было получено в работе [6], где исследовался транспорт в квантовых ямах (КЯ) HgTe. Впоследствии наличие краевого транспорта в КЯ HgTe было подтверждено и в других работах [7–10]. Также была подтверждена нетривиальная спиновая структура краевых состояний [11–13]. Следует отметить, что данные исследования стали возможны благодаря существенному прогрессу в технологии создания эпитаксиальных структур с квантовыми ямами HgTe, обусловленному их важными практическими применениями в качестве детекторов излучения инфракрасного диапазона. Так как CdTe имеет прямую (т.е. не инвертированную) зонную структуру, то спектром интерфейсных состояний в системе HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te можно эффективно управлять за счет изменения содержания кадмия и толщины слоев сверхрешетки. В частности, при ширине щели меньше некоторой критической ширины порядок следования энергетических зон в квантовой яме является нормальным. При ширине равной критической происходит касание дна зоны проводимости и потолка валентной зоны с образованием вблизи уровня Ферми состояний с дираковским спектром. При ширине больше критической происходит инверсия зон, а при дальнейшем увеличении ширины возникает не прямое перекрытие валентной зоны и зоны проводимости с образованием полуметаллического состояния.

Двумерное полуметаллическое состояние в широких квантовых ямах HgTe также обладает рядом уникальных особенностей. Так, двумерный полуметалл в КЯ HgTe является одним из немногих примеров двумерной электрон-дырочной системы, в которой оба типа носителей заряда не разделены пространственно и,

в то же время, вносят существенный вклад в транспортные свойства. Благодаря этому появляются новые возможности изучения эффектов электрон-дырочного взаимодействия в двумерных системах. Кроме того, открытие двумерного полуметалла в КЯ HgTe открывает путь для экспериментального изучения некоторых нерешенных классических вопросов физики конденсированного состояния. Одним из таких вопросов является возможность реализации состояния экситонного изолятора (ЭИ), впервые предсказанного Н. Моттом в 1949 году [14–16]. Тогда было показано, что при определенных условиях полупроводник с малой шириной запрещенной зоны или полуметалл с равным количеством электронов и дырок неустойчивы по отношению к спонтанному формированию электрон-дырочных пар. При таком спаривании система приобретает спектр, сходный со спектром сверхпроводника с характерной энергетической щелью, величина которой при нулевой температуре определяется энергией связи пар.

Одной из особенностей квантовых ям HgTe является то, что их электронный спектр существенно зависит от присутствующих в слоях гетероструктур HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te механических напряжений. Они возникают из-за разности постоянных решетки HgTe и CdTe. Это обстоятельство позволяет эффективно управлять параметрами спектра системы в том числе при помощи приложения внешнего давления. Такая возможность особенно интересна применительно к гетероструктурам с “пограничными” параметрами, соответствующими исчезновению щели в спектре.

Вслед за обнаружением спинового квантового эффекта Холла в двумерных квантовых ямах HgTe начали предприниматься попытки реализации трехмерных топологических изоляторов. В число материалов-кандидатов вошли, в частности, такие соединения как Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃. Интерес к изучению электрических свойств соединений висмута также изначально был связан с их потенциальным практическим применением, так как эти материалы обладают сильными термоэлектрическими свойствами. Первые доказательства существования дираковских поверхностных состояний в данных материалах были полу-

чены методом фотоэмиссионной электронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES), а чуть позднее и методом сканирующей туннельной микроскопии (STM). Транспортные методы изучения свойств поверхностных состояний, тем не менее, сталкиваются в этих материалах со значительными трудностями. В отличие от гетероструктур HgTe, кристаллы Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 не обладают той же степенью чистоты и химической устойчивости. По этой причине они имеют достаточно высокую объемную проводимость, на фоне которой выделение вклада поверхностных состояний становится довольно сложной задачей. Одним из способов уменьшить влияние объема является выращивание эпитаксиальных пленок Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 . При этом, тем не менее, проводимость все еще остается достаточно высокой и на первый план выходит понимание объемных транспортных свойств таких пленок. В частности, большой интерес представляет изучение квантовых эффектов в проводимости, в которые вносят вклад как объемные, так и поверхностные носители заряда. Свойства трехмерных топологических изоляторов на базе соединений висмута также весьма чувствительны к наличию различных примесей. Одним из перспективных направлений исследований является изучение влияния на транспорт в селенидах и теллуридах висмута примесей таких материалов как Cu, Sr, Eu, Cr.

Указанные выше результаты вывели изучение топологических материалов вообще и транспортных свойств квантовых ям HgTe, монокристаллов и эпитаксиальных пленок соединений висмута в частности, в число наиболее актуальных тем в современной физике конденсированного состояния.

Цели и задачи диссертационной работы. Данная работа ставит перед собой следующие цели:

1. Определение возможности реализации новых электронных фаз в широких квантовых ямах HgTe в режиме полуметаллической проводимости под действием гидростатического давления.
2. Определение параметров электрон-электронного взаимодействия в эпи-

таксиальных пленках Bi_2Se_3 при низких температурах.

3. Выделение вклада различных механизмов и групп носителей в транспорт заряда в нелегированных эпитаксиальных пленках Bi_2Se_3 .

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- Измерение магнитосопротивления в перпендикулярном магнитном поле квантовых ям HgTe шириной 20.5 нм в широком диапазоне давлений, температур и концентраций носителей заряда.
- Измерение магнитосопротивления эпитаксиальных пленок Bi_2Se_3 в магнитном поле перпендикулярном и наклонном к поверхности пленки при низких температурах. Выделение и анализ вклада квантовых поправок к проводимости, обусловленных как объемными, так и поверхностными носителями заряда.

Научная новизна.

1. Впервые исследована эволюция магнитотранспортных свойств носителей в широких квантовых ямах топологического полуметалла HgTe под действием гидростатического давления. Обнаружена немонотонная зависимость сопротивления от давления, в т.ч. вблизи точки зарядовой нейтральности, и сильное отрицательное магнитосопротивление.
2. При давлениях около 14 кбар в широких квантовых ямах топологического полуметалла HgTe обнаружен резкий переход от металлического типа проводимости к диэлектрическому, возникающий при понижении температуры ниже 10 К.
3. Впервые, без использования модельных предположений, измерены квантовые поправки взаимодействия к проводимости в трехмерном топологическом изоляторе Bi_2Se_3 . Полученные данные об аномально больших

значениях префактора логарифмической температурной зависимости свидетельствуют о возникновении в пленке нескольких независимых двумерных проводящих каналов.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Показано, что применение гидростатического давления является эффективным инструментом перестройки зонной структуры и свойств HgTe. Определен диапазон давлений, в котором эта перестройка происходит обратимо и выработан протокол приложения давлений и проведения измерений, обеспечивающий получение воспроизводимых результатов.
2. Получены новые данные о поведении магнитотранспортных свойств 2D топологического полуметалла HgTe, которые позволили построить многомерную зависимость $R(B, T, P)$. Проведенное сравнение с существующими теоретическими моделями показало необходимость их уточнения.
3. Продемонстрирована эффективность применения к пленкам топологических изоляторов модельно-независимого подхода, обеспечивающего вычленение абсолютной величины квантовых поправок к проводимости за счет взаимодействия.

Положения, выносимые на защиту.

- Сопротивление широких квантовых ям HgTe в режиме двумерного полуметалла немонотонно зависит от гидростатического давления. В области давлений, соответствующих максимальному сопротивлению, наблюдается эффект сильного отрицательного магнитосопротивления, который может быть объяснен на основе модели Райха - Глазмана температурно-активационной проводимости в двухфазной системе.
- В области давлений 14-15 кбар в широких квантовых ямах HgTe наблюдается переход к диэлектрическому поведению при понижении температуры ниже 10 К, что указывает на установление режима экситонного изолятора.

- Константа электрон-электронного взаимодействия в чистых эпитаксиальных пленках Bi_2Se_3 , определенная из анализа поведения квантовых поправок к проводимости, может принимать аномально большие значения ($K_{ee} > 3$), что находится в противоречии с предсказаниями теории. Это объясняется возникновением в системе нескольких слабосвязанных проводящих каналов, каждый из которых дает независимый вклад в K_{ee} .
- Транспорт заряда в толстых (по сравнению с де Бройлевской длиной волны) эпитаксиальных пленках Bi_2Se_3 имеет двумерный характер как для объемных, так и для поверхностных состояний. Этот вывод справедлив как в слабом, так и в сильном поле, для которого магнитная длина становится меньше толщины пленки.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена тем, что все они были повторены на нескольких образцах с использованием различных методик измерения и измерительных приборов. Все измерения производились при помощи сертифицированной аппаратуры, калиброванной, при необходимости, по эталонам. На каждом образце была проверена воспроизводимость свойств, известных из литературы и установленных другими группами.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях: “Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления”, Троицк, (2015); “XXXVII Совещание по физике низких температур”, Казань, (2015), 21 Международная конференция “Электронные свойства двумерных систем” (EP2DS2015), Япония (2015); “XXI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников”, Екатеринбург (2016); “33 Международная Конференция по Физике Полупроводников” (ICPS2016), Китай (2016).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 4 в рецензируемых научных изданиях [A1-A4], индексируемых в

базе данных Web of Science, и 4 в сборниках тезисов конференций [B1-B4].

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертации, были получены автором лично либо при его непосредственном участии. При проведении описанных в Главе 4 измерений автор лично проводил подготовку к измерениям и характеризацию мезоструктур, созданных в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), выполнил основную часть измерений, включая работу с техникой высоких давлений. Все результаты, приведенные в Главе 5, за исключением рентгеноструктурного анализа образцов, также получены автором полностью самостоятельно. Вклад автора в представленные в Главе 6 результаты состоял в подготовке образцов к измерениям, выполнении низкотемпературных измерений в сильных магнитных полях, а также в измерении эффекта слабой антилокализации при различных ориентациях магнитного поля. Обработка и интерпретация экспериментальных данных, а также подготовка публикаций по результатам исследований проводились совместно с соавторами. Метод выделения поправки от электрон-электронного взаимодействия к проводимости эпитаксиальных пленок Bi_2Se_3 на основе анализа температурных зависимостей холловского коэффициента, использованный в Главе 6 был разработан А.Ю. Кунцевичем и изложен в совместной с автором публикации [A3]. Применение данного метода к определению константы электрон-электронного взаимодействия и соответствующие измерения проведены автором лично и также опубликованы в работе [A3].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. В Главе 1 дается обзор современного состояния области исследований и основных теоретических представлений, использованных в дальнейшем при анализе и интерпретации экспериментальных данных. Глава 2 содержит краткое описание технологии изготовления образцов, исследовавшихся в экспериментах. Также описаны детали экспериментальной техники, применявшейся в ходе измерений. Главы 3-5 посвящены описанию основных результатов работы.

Общий объем диссертации 117 страниц, включая 30 рисунков и одну таблицу. Библиография включает 161 наименование.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе дается обзор современного состояния области исследований. Первая ее часть посвящена описанию свойств гетероструктур с квантовыми ямами HgTe. Обсуждаются особенности электронного спектра родительских полупроводниковых материалов CdTe и HgTe и объясняется явление инверсии электронного спектра. Далее акцент делается на свойствах гетероструктур с квантовыми ямами HgTe различной толщины. Приведены основные известные к настоящему моменту экспериментальные результаты, касающиеся влияния особенностей электронного спектра системы на ее магнитотранспортные свойства. Описывается простейшая квазиклассическая модель Друде для описания магнитотранспортных свойств полупроводниковых и металлических материалов, которая, тем не менее, является основой для первичной характеристики зарядового транспорта в системе. Обсуждаются особенности применения данной модели к двумерным системам с несколькими группами носителей. Обсуждаются условия, при которых необходим учет квантования движения носителей заряда в магнитном поле, приводящий к возникновению квантовых осцилляций магнитосопротивления.

Во второй части обсуждаются транспортные свойства трехмерных топологических изоляторов Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 . Особое внимание уделено особенностям электронного транспорта в тонких эпитаксиальных пленках данных материалов. В частности, обсуждаются отклонения от простой друдевской картины

транспорта, связанные с проявлением эффектов квантовой интерференции. Дается краткое описание теоретических моделей, используемых для анализа квантовых поправок к проводимости, обусловленных эффектами слабой локализации, антилокализации и электрон-электронного взаимодействия. Эти модели в дальнейшем активно используются при обработке и интерпретации экспериментальных данных.

Во второй главе описаны экспериментальные образцы и методы измерений, применявшиеся в ходе работы. Во всех экспериментах нами использовались образцы, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В случае с HgTe они представляли из себя многослойные гетероструктуры, в которых КЯ HgTe заключена между несколькими вспомогательными слоями. Для проведения магнитотранспортных измерений были созданы мезоструктуры в виде холловских мостиков стандартной геометрии. Поверх структур был нанесен слой диэлектрика и электростатический затвор, позволявший управлять концентрацией носителей заряда в квантовой яме.

Для измерений транспорта в Bi_2Se_3 использовались эпитаксиальные пленки с толщинами 10-15 нм, из которых также были изготовлены холловские мостики.

Измерения под давлением проводились в немагнитных цилиндрических камерах высокого давления типа поршень-цилиндр. Образец при этих измерениях размещался в тефлоновой капсуле, заполненной кремний-органической жидкостью ПЭС-1, обеспечивающей условия гидростатического сжатия. Давление создавалось и фиксировалось при комнатной температуре, после чего камера охлаждалась. Низкотемпературные измерения выполнялись с использованием криостатов с гелием-4, оснащенных сверхпроводящими соленоидами. Для получения температур ниже 1.8 К использовалась низкотемпературная вставка с гелием-3, позволявшая получать температуры до 0.3 К.

Электрические измерения проводились при помощи стандартной техники синхронного детектирования на частотах 10-80 Гц. Характерные измеритель-

ные токи лежали в диапазоне 1-100 нА, что обеспечивало отсутствие перегрева образцов током в процессе измерений. Для устранения эффекта асимметрии контактов измерения в магнитном поле проводились в двух противоположных ориентациях магнитного поля. Такой подход позволяет при обработке экспериментальных данных определить продольное и холловское сопротивление, используя процедуру симметризации/антисимметризации данных.

В третьей главе представлены результаты транспортных измерений, проведенных с квантовой ямой (КЯ) HgTe с ориентацией подложки (100) шириной 20 нм при гидростатическом давлении около 14.4 кбар.

При толщине 20 нм HgTe представляет из себя двумерный полуметалл с непрямым перекрытием зоны проводимости и валентной зоны. Число таких материальных систем очень мало, так что изучение транспортных свойств широких КЯ HgTe дает уникальную возможность для продвижения в решении одной из фундаментальных задач физики твердого тела, имеющей длительную историю - проблемы реализации состояния экситонного изолятора.

В работах [14, 15, 17, 18], было показано, что полупроводник с узкой энергетической щелью или полуметалл с равным количеством электронов и дырок неустойчивы при определенных условиях, по отношению к формированию электрон-дырочных пар и возникновению нового электронного состояния экситонного диэлектрика. Для перехода в это состояние необходимо, чтобы размер энергетической щели в полупроводнике или величина перекрытия зон в полуметалле не превосходили энергию связи экситонов. В большинстве полуметаллов и полупроводников указанное выше условие не выполнено, но в узкозонных полупроводниках и полуметаллах с малой величиной перекрытия зон переход теоретически возможен.

В КЯ HgTe энергия связи экситонов оказывается заметно меньше величины перекрытия валентной зоны и зоны проводимости. Последняя, тем не менее, может быть уменьшена [19] за счет приложения гидростатического давления.

На Рисунке 1 показан основной результат наших измерений - резкая транс-

формация вида температурной зависимости сопротивления образца при приложении давления. В данном случае напряжение на затворе соответствует точке электронейтральности (ТЭН), т.е. ситуации, когда концентрации электронов и дырок одинаковы.

Сопротивление образца вблизи ТЭН явно демонстрирует экспоненциальный рост, который начинается только при температуре ниже 10 К. Эта температурная зависимость радикально отличается от той, что наблюдается при нулевом давлении. Характерная для активационного роста величина щели мала, что можно было бы связать с близостью к Моттовскому переходу. Тем не менее, при отходе напряжения на затворе от соответствующей ТЭН величины рост сопротивления с понижением температуры становится гораздо более мягким и не описывается активационным законом.

Такое поведение явно указывает на переход металл-изолятор при температуре около 10 К, что согласуется с ожидаемым переходом в фазу экситонного изолятора. Тем не менее, согласно теории, величина щели в энергетическом спектре должна по порядку

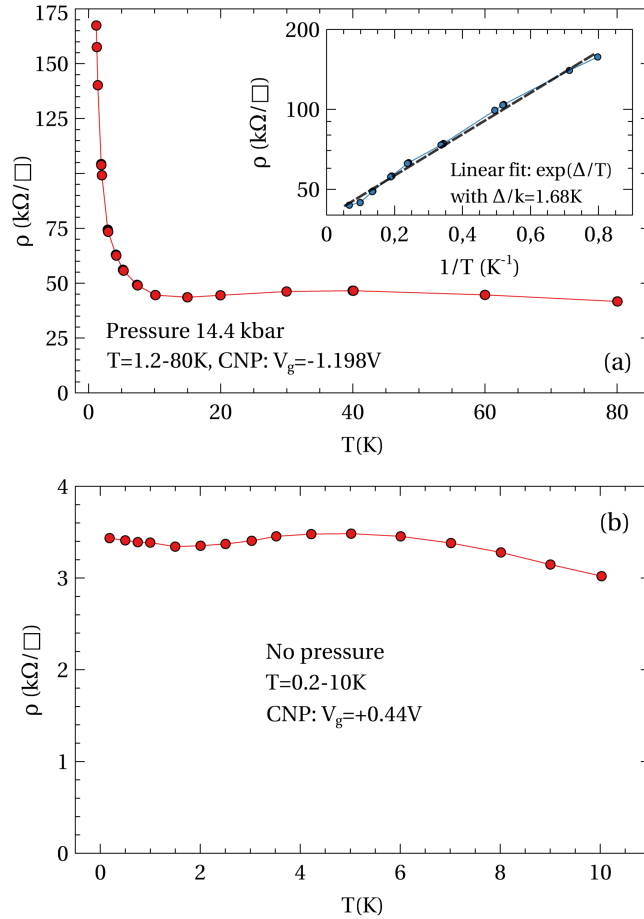


Рис. 1. (a) Зависимость сопротивления от температуры в точке электронейтральности (CNP, $N_s = P_s$) под давлением 14.4 кбар. На врезке показан результат подгонки низкотемпературной части кривой активационной зависимости. (b) Зависимость сопротивления от температуры при нулевом давлении [A1].

величины совпадают с температурой перехода и энергией связи экситонов. В то время как T_c в нашем случае действительно близка к E_B , величина энергетической щели, Δ , оказывается в четыре раза меньше этой оценки. Одной из причин такого расхождения может быть беспорядок, присутствующий в системе.

Результаты третьей главы опубликованы в работе [A1].

В четвертой главе изложены результаты изучения магнитотранспортных свойств КЯ HgTe в перпендикулярном магнитном поле при гидростатическом давлении от 0 до 15.1 кбар.

Нами были проведены систематические измерения магнитотранспорта при давлениях, которые изначально прикладывались в следующей последовательности: $0 \rightarrow 15.1 \rightarrow 14.1 \rightarrow 12 \rightarrow 13.2 \rightarrow 10.5 \rightarrow 8.6 \rightarrow 5.8 \rightarrow 4.5 \rightarrow 0$ кбар. При возрастании давления до 8.6 кбар сопротивление образца также растет. Именно такой зависимости можно ожидать на основе расчетов зонной структуры [19], которые предсказывают уменьшение перекрытия зон при увеличении давления. При более высоких давлениях, тем не менее, сопротивление ведет себя неожиданно - его рост с давлением насыщается и сменяется падением в противоречии с простой моделью спектра.

Рисунок 2 суммирует картину изменения с давлением температурных зависимостей сопротивления в точке электронейтральности, измеренных в нулевом магнитном поле при температуре 1.3 К.

Для получения дополнительной информации о характере изменений транспортных свойств системы с давлением нами также были проведены измерения в перпендикулярном магнитном поле. Напряжение на затворе изменялось в пределах от -1.5 В до +1.5 В (относительно ТЭН), а температуры варьировались от 1.3 до 30 К. При измерениях использовались магнитные поля до 4 Тл. Общая картина магнитотранспорта выглядит гораздо наглядней в терминах проводимости σ_{xx} и σ_{xy} , полученной путем инверсии тензора магнитосопротивления. Пример результата таких измерений при давлении 10.5 кбар показан на Рисунке 3. Из полученных данных видно, что можно выделить три характерных ре-

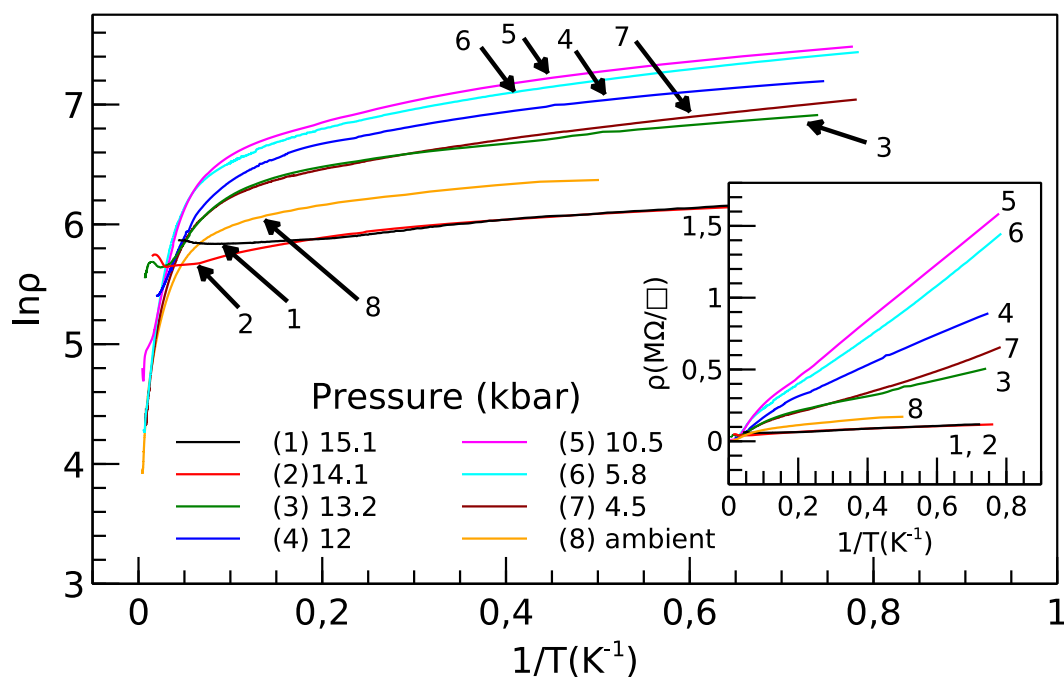


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления образца в точке электронейтральности при различных давлениях. Данные при нулевом давлении отвечают состоянию образца после сброса давления по окончании всего цикла измерений. На врезке показаны зависимости R от $1/T$ в низкотемпературной области. Номера кривых на врезке соответствуют номерам на основном графике [A4].

жима поведения проводимости в магнитном поле в зависимости от концентрации и знака основных носителей заряда в системе (они условно обозначены на Рисунке 3 как Region I, II и III). Область (I) соответствует электронам как основным носителям заряда в системе. Она характеризуется достаточно большой проводимостью в слабом магнитном поле и проявлениями квантового эффект Холла (КЭХ) в более сильных полях. В слабом магнитном поле проводимость в этой области имеет квазиклассическую форму, на фоне которой наблюдаются отклонения в виде интерференционных поправок от слабой локализации и антилокализации. Область (II) находится вблизи точки электронейтральности, где концентрации электронов и дырок примерно одинаковы и достаточно малы по сравнению с другими областями. Здесь наблюдается прыжковый тип транспорта с сильным отрицательным магнитосопротивлением. Такое поведение удается

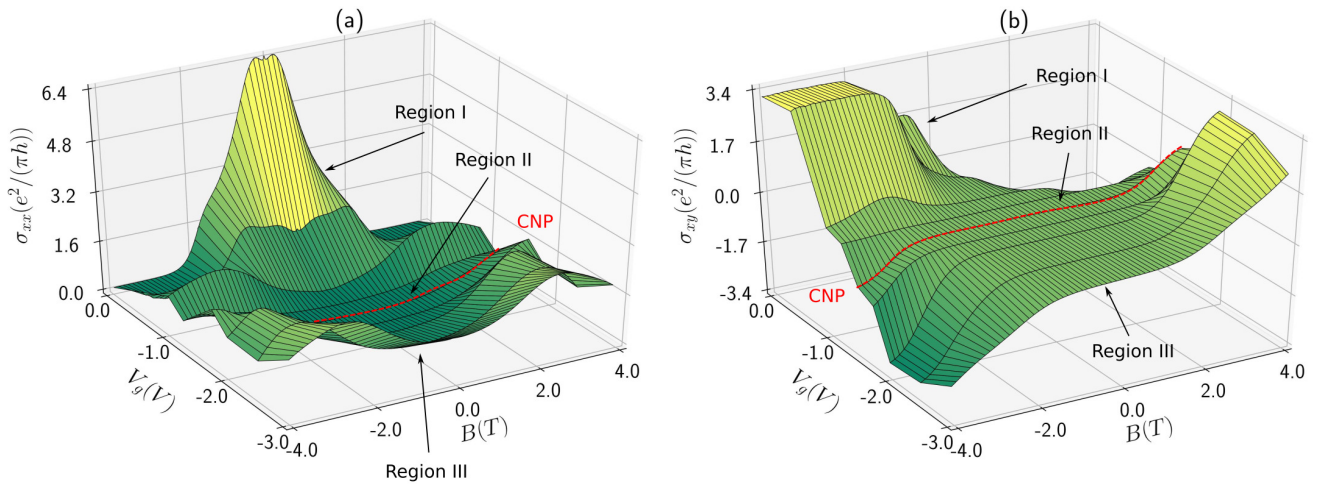


Рис. 3. Зависимости (а) σ_{xx} и (б) σ_{xy} от напряжения на затворе V_g и величины магнитного поля при давлении 10.5 кбар и температуре 1.3 К [A4].

достаточно хорошо воспроизвести при помощи простой модели Райха - Глазмана [20], предполагающей наличие в системе макроскопических областей когерентного транспорта, разделенных непроводящими барьерами. Результаты подгонки данных по магнитосопротивлению вблизи ТЭН при помощи этой модели приведены на Рисунке 4. В области (III), где основными носителями являются дырки с низкой подвижностью наблюдается переход от прыжкового типа транспорта при более низких температурах к квазиклассическому при более высоких. Наблюдаемое поведение отчасти согласуется с теоретической картиной транспорта в двумерном полуметалле в присутствии длинноволнового беспорядка, предложенной в работе [21].

Результаты четвертой главы опубликованы в работе [A4].

В пятой главе описаны результаты изучения вклада квантовых поправок к проводимости, обусловленных эффектами слабой антилокализации и электрон-электронного взаимодействия в магнитотранспортные свойства эпитаксиальных пленок Bi_2Se_3 .

Нами была изучена серия пленок Bi_2Se_3 с различными значениями толщины, а также концентрации и подвижности носителей заряда. В основном, пред-

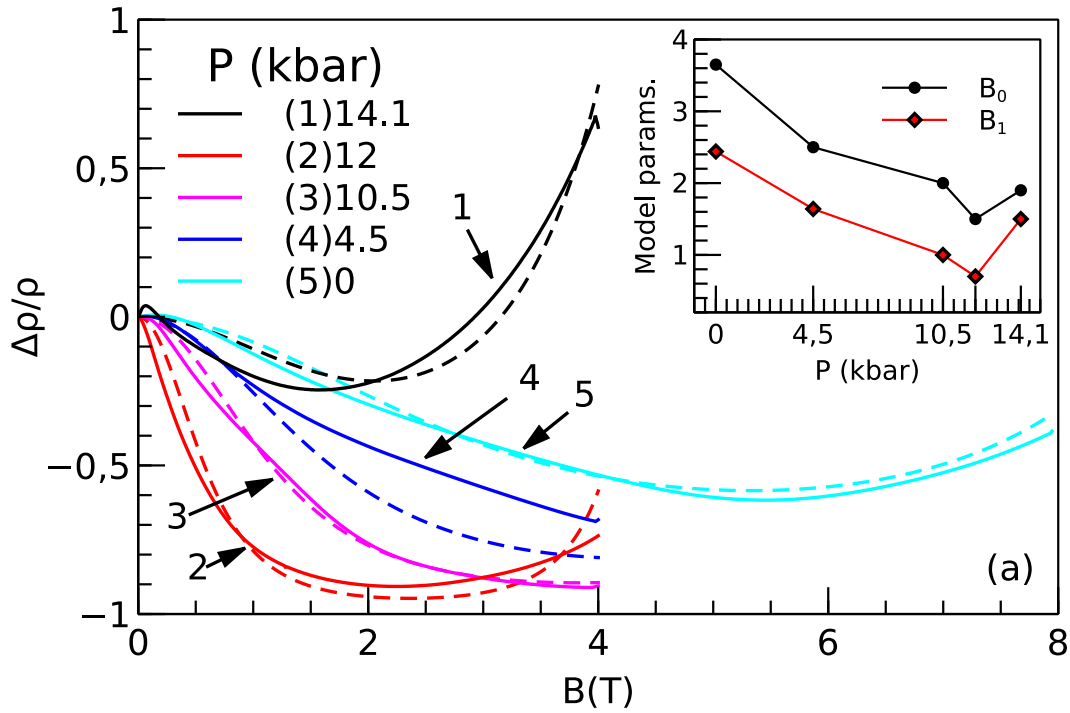


Рис. 4. Результаты подгонки данных $R(B)$ формулой Райха-Глазмана [20] при различных давлениях. Напряжение на затворе, V_g , для всех кривых соответствует точке электронейтральности. Экспериментальные данные показаны сплошными линиями, в то время как подгоночные кривые - пунктирными. На врезке приведены зависимости двух подгоночных параметров от давления [A4].

ставлены результаты, полученные на четырех образцах с условными номерами 724, 711, 685 и 691. В качестве примера на Рисунке 5(a) показаны магнитосопротивление и эффект Холла для образца 711 в широком диапазоне (до 16 Тесла) магнитных полей при температуре 1.6 К. Похожие зависимости наблюдаются и для других образцов. Полученные зависимости удается удовлетворительно описать только в предположении наличия в системе как минимум двух групп носителей заряда, причем подвижность одной из них оказывается значительно больше, чем другой. Мы ассоциируем высокоподвижную группу с поверхностными носителями, а низкоподвижную - с объемными.

В сильных магнитных полях кривые магнитосопротивления образцов в зависимости от перпендикулярной компоненты поля при разных углах наклона (относительно нормали к плоскости пленки) совпадают. Пример наложения

кривых для образца 711 показан на вставке на Рисунке 5(a). Положение минимумов осцилляций ШдГ после вычитания монотонного МС также зависит только от перпендикулярной компоненты магнитного поля, как это показано на Рисунке 5(b). Отсутствие влияния параллельного поля на магнитосопротивление указывает на то, что все носители в системе с точки зрения транспортных свойств ведут себя как двумерные.

Поведение продольного магнитосопротивления в слабых полях на примере образцов 711 и 724 представлено на Рисунке 6. Видно, что при низких температурах наблюдается эффект слабой антилокализации в отсутствие слабой локализации. По изменению кривых при изменении наклона магнитного поля видно, что сопротивление зависит только от перпендикулярной компоненты поля - при пересчете кривые практически полностью совпадают. Отсутствие видимых признаков слабой локализации на полях зависимости нетривиально для обычных двумерных систем [22], но согласуется с теоретическими представлениями об интерфейсных состояниях в ТИ [23].

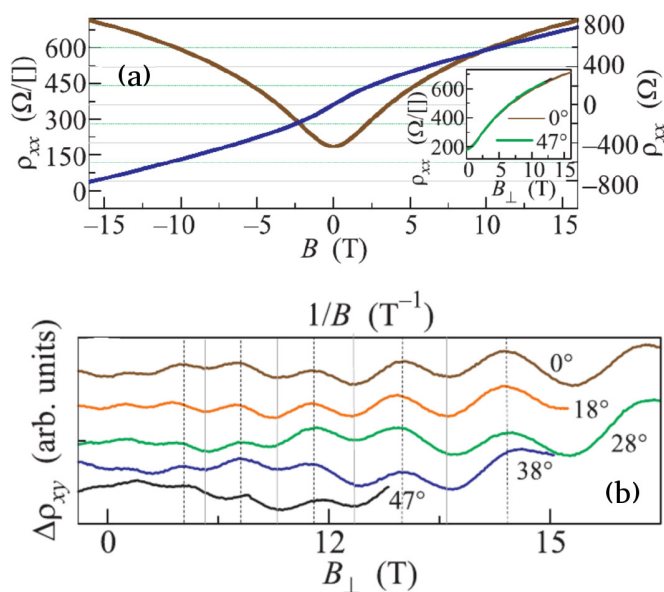


Рис. 5. (a) продольная и холловская компоненты магнитосопротивления образца 711 при температуре 1.6 К в широком диапазоне магнитных полей; на вставке - магнитосопротивление в зависимости от перпендикулярной компоненты поля для двух углов наклона магнитного поля (0° и 50° относительно нормали к поверхности пленки); (b) осцилляции сопротивления в зависимости от перпендикулярной составляющей поля для различных углов наклона [A2].

Для выделения вклада квантовых поправок мы производим пересчет удель-

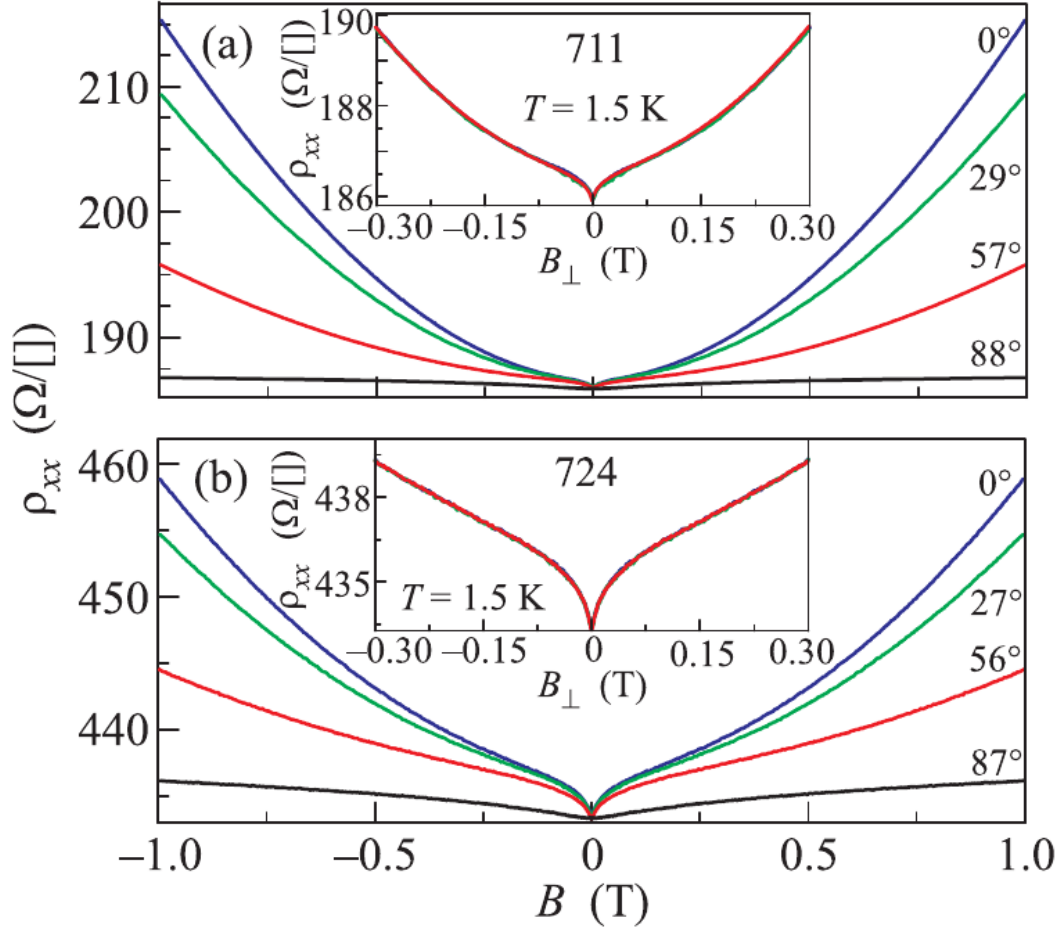


Рис. 6. Магнитосопротивление образцов 711 (a) и 724 (b) при температуре 1.5 К в наклонных магнитных полях; на вставках показаны три полученные кривые, соответствующие углам поворота $0^\circ \div 60^\circ$, в зависимости от перпендикулярной компоненты магнитного поля. В таком представлении кривые сливаются в одну с точностью до ошибки измерений [A2].

ного сопротивления в проводимость и вычитаем из значений проводимости в нулевом магнитном поле величину проводимости при температуре 8 К, где пик слабой локализации исчезает. Результирующая зависимость $\sigma_0^{\Delta T} = \sigma_0(T) - \sigma_0(8K)$ является немонотонной. Так как согласно двухзонной модели Друде монотонная составляющая проводимости в слабом поле ведет себя следующим образом:

$$\sigma_D \approx e(\mu_S n_S + \mu_V n_V) - B^2 e(\mu_S^3 n_S + \mu_V^3 n_V) \equiv D_0 + D_1 B^2,$$

то вычитая монотонную квадратичную по магнитному полю часть $D_1 B^2$ из

зависимостей $\sigma_0^{\Delta T}(B, T)$ мы получаем сумму почти не зависящего от температуры друдевского вклада, D_0 , и вклада от квантовых поправок к проводимости, $\delta\sigma_q(T, B) + \delta\sigma_{WAL}(B, T)$, где $\delta\sigma_{WAL}$ - добавка к проводимости от слабой антилокализации (WAL), а в σ_q входят все остальные поправки, имеющие слабую зависимость от магнитного поля. Так как магнитное поле подавляет WAL, а σ_q от магнитного поля практически не зависит, то значения проводимости в достаточно сильном поле дают нам величину $\sigma_q(T) + D_0$, которая уменьшается при охлаждении. При этом характер изменения $\sigma_q + D_0$ с температурой близок к логарифмическому, что может быть обусловлено только температурной зависимостью $\sigma_q(T)$. Уменьшение проводимости системы при охлаждении при наличии положительной добавки, связанной с WAL является проявлением так называемого “транспортного парадокса”, обнаруженного ранее другими группами исследователей [24–26]. Логарифмический характер зависимости $\sigma_q(T)$ является одним из аргументов в пользу того, что низкотемпературное падение проводимости в исследуемой системе обусловлено квантовой поправкой от электрон-электронного взаимодействия. Результаты описанных выше вычислений иллюстрирует Рисунок 7.

Выделенная указанным выше способом поправка от слабой антилокализации, может быть проанализирована на основании стандартной модели Хиками - Ларкина - Нагаоки [27], содержащей два подгоночных параметра - префактор α , связанный с эффективным числом независимых проводящих каналов в системе, и длину дефазировки l_φ . Температурная зависимость параметра l_φ указывает на то, что основным механизмом потери фазовой когерентности в системе является электрон-электронное рассеяние. Для префактора α на образцах 711, 685 и 691 оказывается близким к 0.5, однако для образца 724 получается значение близкое к 0.3. Столь малая величина префактора может объясняться эффектом гибридизации поверхностных и объемных состояний. Для последних помимо антилокализации может наблюдаться и эффект слабой локализации, эффективно дающий отрицательный вклад в величину α [28].

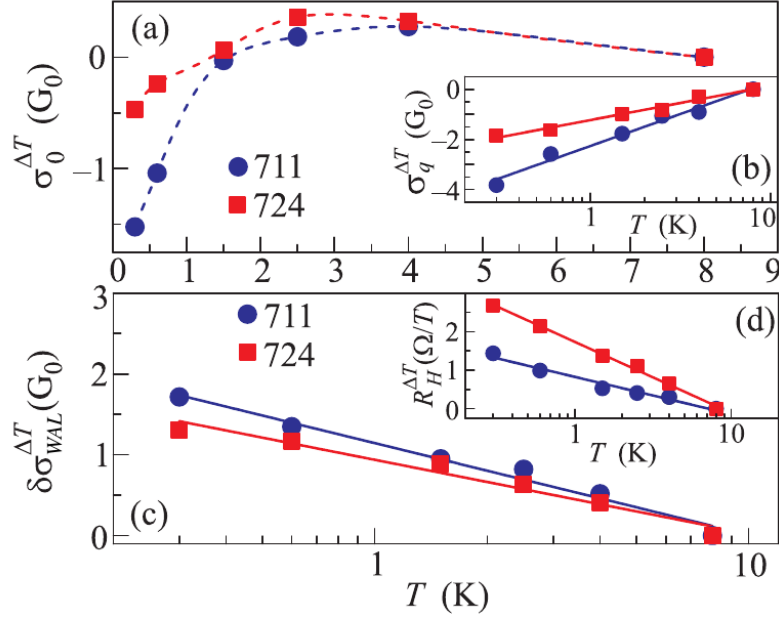


Рис. 7. Температурные зависимости изменения величин $\sigma_0^{\Delta T} = \sigma_0(T) - \sigma_0(8K)$ (a), $\sigma_q^{\Delta T} = \sigma_q(T) - \sigma_q(8K)$ (b), $\delta\sigma_{WAL}^{\Delta T} = \delta\sigma_{WAL}(T) - \delta\sigma_{WAL}(8K)$ (c), и холловской константы в малых полях $R_H^{\Delta T}$ (d), линии проведены для наглядности [A2].

Знание величины поправки от электрон-электронного взаимодействия, σ_q , позволяет определить величину константы электрон-электронного взаимодействия, K_{ee} , в соответствии с формулой $K_{ee} \equiv 2\pi^2\hbar/e^2 \times \partial\sigma_q/\partial \ln T$. При этом, однако, нам необходимо предположить, что вся температурная зависимость сопротивления, полученная после вычитания друдевского фона и WAL-поправки определяется ee - поправкой. Это предположение может быть проверено независимо при помощи феноменологического подхода, основанного на анализе температурной зависимости холловского сопротивления при помощи соотношения [29]

$$\frac{\Delta\rho_{xy}}{\rho_{xy}} = 2\frac{\Delta\rho_{xx}}{\rho_{xx}} = -2\frac{\Delta\sigma_{ee}}{\sigma_D}, \quad (1)$$

связывающего поправку к продольной и холловской компонентам тензора магнитосопротивления от электрон-электронного взаимодействия. Два разных подхода дают практически одинаковую величину поправки к проводимости, обусловленную когерентными, но не интерференционными механизмами. Этот факт является существенным аргументом в пользу того, что дополнительная темпе-

ратурная зависимость сопротивления при низких температурах действительно связана с ЕЕІ. Более подробно данное утверждение обосновано в части работы [А3], не вошедшей в настоящую диссертацию.

В результате анализа температурных зависимостей поправок к проводимости от ee -взаимодействия нами установлено, что значения $K_{ee} = 3.1$ для образца 685 и $2.5 \div 2.8$ для образца 691, необычайно велики и превышают величины, полученные в [24, 30–33], в то время как для образцов 711 и 724 получены значения $K_{ee} = 1.5 \div 1.8$. Одной из причин такой большой величины K_{ee} может быть эффективная независимость проводящих каналов друг от друга. Подобный механизм был предложен в работе [26], где также наблюдались значения $K_{ee} > 2$. Естественно, что для больших концентраций носителей заряда многие подзоны квантования оказываются заполнены. Если бы с каждой из этих подзон был связан свой независимый канал проводимости, то каждый из них давал бы вклад в поправку к проводимости $\Delta\sigma_{ee}^i$ с $K_{ee} \sim 1$. В этом случае общая величина ЕЕІ-поправки была бы суммой этих вкладов и была бы очень большой. На практике электроны из различных подзон взаимодействуют друг с другом и количество эффективных каналов, дающих вклад в ee -поправку может свестись к одному. Причины по которым подобное взаимодействие подавлено в образцах $\text{Bi}_2\text{Se}_3 - 685$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_3 - 691$ к настоящему моменту пока не ясны.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [А2, А3].

В Заключение сформулированы основные результаты проведенных исследований и дано обсуждение направлений дальнейшего развития работы. Результаты могут быть суммированы следующим образом:

1. Впервые изучены магнитотранспортные свойства квантовых ям HgTe с ориентацией подложки (100) в перпендикулярном магнитном поле в широком диапазоне давлений от 0 до 15.1 кбар. Измерения выявили сложную немонотонную зависимость сопротивления образцов от давления, температуры, магнитного поля и концентрации носителей. Показано, что в об-

ласти промежуточных давлений наблюдается эффект сильного отрицательного магнитосопротивления, связанный с температурно-активированными прыжками носителей между проводящими областями в двухфазной системе.

2. В области высоких давлений более 14 кбар обнаружен резкий переход от металлического типа проводимости к диэлектрическому при понижении температуры, что является указанием на установление в системе нового электрон-дырочного состояния.
3. Проведены измерения температурной зависимости диагональной и холловской компонент магнитосопротивления высококачественных эпитаксиальных пленок Bi_2Se_3 в перпендикулярном и наклонном магнитном поле. Показано, что константа электрон-электронного взаимодействия, определенная из анализа поведения квантовых поправок к проводимости может принимать аномально большие значения ($K_{ee} > 3$), указывающие на возникновение в системе нескольких слабосвязанных проводящих каналов.
4. С помощью простой классической модели магнитосопротивления оценен вклад каждой группы носителей заряда в проводимость пленок Bi_2Se_3 . Результаты проведенного анализа особенностей слабой антилокализации указывают на топологическую природу поверхностных состояний в исследованных пленках. При этом установлено, что состояния в объеме пленки проявляются в магнитотранспорте как двумерные не только в слабых, но и в сильных магнитных полях.

Публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях.

- A1. Olshanetsky E.B., Kvon Z.D., Gerasimenko Ya.A., Prudkoglyad V.A., Pudalov V.M., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A. Metal-insulator transition in a HgTe quantum well under hydrostatic pressure // [Pis'ma v ZhETF](#) – 2013 – Vol. 98, No. 12. – pp. 947-951; [JETP letters](#) – 2014. – Vol. 98, No. 12. – P. 843-847.
- A2. Овешников Л.Н., Прудкогляд В.А., Нехаева Е.И., Кунцевич А.Ю., Селиванов Ю.Г., Чижевский Е.Г., Аронзон Б.А. Магнетотранспорт в тонких эпитаксиальных пленках Bi_2Se_3 // [Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики](#) – 2016. – Том 104, № 9. – С. 651-657; Oveshnikov L.N., Prudkoglyad V.A., Nekhaeva E.I., Kuntsevich A. Yu., Selivanov Yu.G., Chizhevskii E.G., Aronzon B.A. Magnetotransport in thin epitaxial Bi_2Se_3 films // [JETP Letters](#) – 2016. – Vol. 104, No. 9. – P. 629-634 (English translation).
- A3. Kuntsevich A.Yu., Gabdullin A.A., Prudkoglyad V.A., Selivanov Yu.G., Chizhevskii E.G., Pudalov V.M. Low-temperature Hall effect in bismuth chalcogenides thin films // [Physical Review B](#) – 2016. – Vol. 94, No. 23 – P. 235401.
- A4. Prudkoglyad V.A., Olshanetsky E.B., Kvon Z.D., Pudalov V.M., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A. Two-dimensional semimetal in HgTe quantum well under hydrostatic pressure // [Physical Review B](#) – 2018. – Vol. 98, No. 15. – P. 155437.

Публикации в материалах конференций.

- B1. Прудкогляд В.А., Ольшанецкий Е.Б., Квон З.Д., Пудалов В.М., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Влияние внешнего гидростатического давления на зарядовый транспорт в квантовой яме HgTe шириной 20 нм // XXXVII Собрание по физике низких температур НТ-37 (Казань, 29 июня - 3 июля 2015г.): Программа, тезисы докладов, N07 – С. 159.

- В2. Прудкогляд В.А., Ольшанецкий Е.Б., Квон З.Д., Пудалов В.М., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Effect of Hydrostatic Pressure on Charge Transport in HgTe Quantum Well with Inverted Energy Spectrum // Electronic Properties of Two-Dimensional Systems EP2DS-21 (Sendai, Japan, July 26-31, 2015): 21-st International Conference – P. 315.
- В3. Прудкогляд В.А., Ольшанецкий Е.Б., Квон З.Д., Пудалов В.М., Мартовицкий В.П., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Магнитотранспорт в квантовой яме HgTe шириной 20.5 нм в условиях гидростатического давления // Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, 15–20 февраля 2016 г.): сборник тезисов XXI международной зимней школы. – Екатеринбург: Типография «Межрегиональный издательский центр», 2016 – С. 140.
- В4. Прудкогляд В.А., Ольшанецкий Е.Б., Квон З.Д., Мартовицкий В.П., Пудалов В.М., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., 2D electron-hole system in HgTe quantum well under hydrostatic pressure // 33 International conference on the Physics of Semiconductors ICPS2016 (Beijing, China, July 31 - August 5, 2016): 33rd International Conference – Мо-Р.142.

Цитированная литература

1. Волков Б. А., Панкратов О. А., Сазонов А. В. Теория электронного энергетического спектра полупроводников группы A4B6 // [ЖЭТФ](#). — 1983. — Т. 85, № 4. — С. 1395.
2. Волков Б. А., Панкратов О. А. Электронная структура точечных дефектов в полупроводниках AIVBVI // [ЖЭТФ](#). — 1985. — Т. 88, № 1. — С. 280–293.
3. Волков Б. А., Панкратов О. А. Безмассовые двумерные электроны в инверсном контакте // [Письма в ЖЭТФ](#). — 1985. — Т. 42, № 4. — С. 145–148.

4. Kosterlitz J. M., Thouless D. J. Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems // [J. Phys. C: Solid State Phys.](#) — 1973. — Vol. 6, no. 7. — P. 1181.
5. Thouless D. J., Kohmoto M., Nightingale M. P., Nijs M. D. Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential // [Phys. Rev. Lett.](#) — 1982. — Vol. 49, no. 6. — P. 405.
6. König M., Wiedmann S., Brüne C. et al. Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells // [Science.](#) — 2007. — Vol. 318, no. 5851. — P. 766–770.
7. Gusev G. M., Kvon Z. D., Shegai O. A. et al. Transport in disordered two-dimensional topological insulators // [Phys. Rev. B.](#) — 2011. — Vol. 84, no. 12. — P. 121302.
8. Roth A., Brüne C., Buhmann H. et al. Nonlocal transport in the quantum spin Hall state // [Science.](#) — 2009. — Vol. 325, no. 5938. — P. 294–297.
9. Nowack K. C., Spanton E. M., Baenninger M. et al. Imaging currents in HgTe quantum wells in the quantum spin hall regime // [Nat. Mater.](#) — 2013. — jun. — Vol. 12, no. 9. — P. 787–791.
10. Hart S., Ren H., Wagner T. et al. Induced superconductivity in the quantum spin hall edge // [Nat. Phys.](#) — 2014. — aug. — Vol. 10, no. 9. — P. 638–643.
11. Brüne C., Roth A., Buhmann H. et al. Spin polarization of the quantum spin Hall edge states // [Nat. Phys.](#) — 2012. — Vol. 8, no. 6. — P. 485–490.
12. Kononov A., Egorov S. V., Titova N. et al. Conductance oscillations at the interface between a superconductor and the helical edge channel in a narrow HgTe quantum well // [JETP Letters.](#) — 2015. — jan. — Vol. 101, no. 1. — P. 41–46.
13. Kononov A., Egorov S. V., Kvon Z. D. et al. Evidence on the macroscopic length scale spin coherence for the edge currents in a narrow HgTe quantum well // [JETP Letters.](#) — 2015. — jun. — Vol. 101, no. 12. — P. 814–819.
14. Mott N. F. The basis of the electron theory of metals, with special reference to the transition metals // [Proc. Phys. Soc., London, Sect. A.](#) — 1949. —

- Vol. 62, no. 7. — P. 416.
15. Mott N. F. The transition to the metallic state // [Philosophical Magazine](#). — 1961. — Vol. 6, no. 62. — P. 287–309.
 16. Halperin B. I., Rice T. M. Possible anomalies at a semimetal-semiconductor transition // [Rev. Mod. Phys.](#) — 1968. — Vol. 40, no. 4. — P. 755.
 17. Kohn W. Excitonic phases // [Phys. Rev. Lett.](#) — 1967. — aug. — Vol. 19, no. 8. — P. 439–442.
 18. Jérôme D., Rice T. M., Kohn W. Excitonic insulator // [Phys. Rev.](#) — 1967. — Vol. 158, no. 2. — P. 462.
 19. Krishtopenko S. S., Yahniuk I., But D. B. et al. Pressure and temperature driven phase transitions in HgTe quantum wells // [Phys. Rev. B](#). — 2016. — Vol. 94, no. 24. — P. 245402.
 20. Raikh M. E., Glazman L. I. Negative hopping magnetoresistance of two-dimensional electron gas in a smooth random potential // [Phys. Rev. Lett.](#) — 1995. — Vol. 75, no. 1. — P. 128.
 21. Knap M., Sau J. D., Halperin B. I., Demler E. Transport in two-dimensional disordered semimetals // [Phys. Rev. Lett.](#) — 2014. — Vol. 113. — P. 186801.
 22. Koirala N., Brahlek M., Salehi M. et al. Record surface state mobility and quantum Hall effect in topological insulator thin films via interface engineering // [Nano letters](#). — 2015. — Vol. 15, no. 12. — P. 8245–8249.
 23. Lu H. Z., Shen S. Q. [Weak localization and weak anti-localization in topological insulators](#) // SPIE NanoScience+ Engineering / International Society for Optics and Photonics. — 2014. — P. 91672E–91672E.
 24. Liu H. C., Lu H. Z., He H. T. et al. Tunable interaction-induced localization of surface electrons in antidot nanostructured Bi₂Te₃ thin films // [ACS nano](#). — 2014. — Vol. 8, no. 9. — P. 9616–9621.
 25. Zhang M., Lv L., Wei Z. et al. Thermal evaporation growth of topological insulator Bi₂Se₃ thin films // [Materials Letters](#). — 2014. — Vol. 123. — P. 87–89.
 26. Wang W. J., Gao K. H., Li Z. Q. Thickness-dependent transport channels in

- topological insulator Bi_2Se_3 thin films grown by magnetron sputtering // [Sci. Rep.](#) — 2016. — Vol. 6. — P. 25291.
27. Hikami S., Larkin A. I., Nagaoka Y. Spin-orbit interaction and magnetoresistance in the two dimensional random system // [Prog. Theor. Phys.](#) — 1980. — Vol. 63, no. 2. — P. 707–710.
28. Lu H. Z., Shen S. Q. Finite-temperature conductivity and magnetoconductivity of topological insulators // [Phys. Rev. Lett.](#) — 2014. — Vol. 112, no. 14. — P. 146601.
29. Altshuler B. L., Aronov A. G. [Electron–electron interaction in disordered conductors](#) // Modern Problems in condensed matter sciences. — Elsevier, 1985. — Vol. 10. — P. 1–153.
30. Liu M., Chang C. Z., Zhang Z. et al. Electron interaction-driven insulating ground state in Bi_2Se_3 topological insulators in the two-dimensional limit // [Phys. Rev. B.](#) — 2011. — Vol. 83, no. 16. — P. 165440.
31. Wang J., DaSilva A. M., Chang C. Z. et al. Evidence for electron-electron interaction in topological insulator thin films // [Phys. Rev. B.](#) — 2011. — Vol. 83, no. 24. — P. 245438.
32. Takagaki Y., Jenichen B., Jahn U. et al. Weak antilocalization and electron-electron interaction effects in Cu-doped Bi_2Se_3 films // [Phys. Rev. B.](#) — 2012. — Vol. 85, no. 11. — P. 115314.
33. Dey R., Pramanik T., Roy A. et al. Strong spin-orbit coupling and zeeman spin splitting in angle dependent magnetoresistance of Bi_2Te_3 // [Appl. Phys. Lett.](#) — 2014. — Vol. 104, no. 22. — P. 223111.

Подписано в печать: 19.01.2022
Заказ №18704. Тираж - 100 экз.
Бумага офсетная. Формат 60х90/16.
Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(977) 518-13-77 (499) 788-78-56
www.avtoreferat.ru riso@mail.ru

