

На правах рукописи

КОНОНОВ Артем Александрович

**Исследование транспорта между двумерной электронной  
системой со спин-орбитальным взаимодействием и  
металлом с макроскопическим параметром порядка**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твердого тела Российской академии наук.

**Научный руководитель:** **Девятов Эдуард Валентинович**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Пудалов Владимир Моисеевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий отделом  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Физический институт им.  
П.Н.Лебедева Российской академии наук

**Фоминов Яков Викторович**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт теоретиче-  
ской физики им. Л.Д. Ландау Российской  
академии наук

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Физико-технический ин-  
ститут им. А.Ф. Иоффе Российской академии  
наук

Защита состоится 18 апреля 2016 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 002.100.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела Российской академии наук по адресу: 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН и на сайте диссертационного совета по адресу: <http://www.issp.ac.ru/main/dis-council.html>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.100.01,  
доктор физико-математических наук

Зверев В.Н.

©Кононов А.А., 2016  
©ИФТТ РАН, 2016

## Общая характеристика работы

Спин орбитальное взаимодействие в системах, которые не имеют центра инверсии, может приводить к возникновению нетривиальных физических эффектов. К их числу, например, относятся спиновый эффект Холла, квантовый спиновый эффект Холла, состояние топологического изолятора, топологическая сверхпроводимость, майорановские фермионы и другие [1]. Исследование этих явлений представляет интерес как с точки зрения фундаментальной науки, так и из-за потенциальной применимости для нужд спинтроники и создания квантовых компьютеров.

Интерес к гибридным системам на основе электронных систем со спин-орбитальным взаимодействием в контакте со сверхпроводником во многом связан с поиском майорановских фермионов и состояния топологической сверхпроводимости [2, 3]. Одной из возможностей для формирования состояния топологической сверхпроводимости является использование обычного сверхпроводника со спариванием s-типа, связанного с материалом с сильным спин-орбитальным взаимодействием [4]. Значительная часть экспериментов в этой области использовала SNS-структуры (сверхпроводник - нормальный металл - сверхпроводник), в которых в качестве N-области использовались одномерные нанопровода со спин-орбитальным взаимодействием или поверхностные топологические состояния. Интересным для изучения является, например, использование геликоидальных краевых состояний в HgTe квантовых ямах. Эти состояния формируются в HgTe квантовых ямах, с толщиной более 6.3 нм, из-за инвертированной зонной структуры объемного HgTe [5, 6].

С другой стороны можно ожидать нетривиальных эффектов, вызванных модификацией спектра двумерной электронной системы со спин-орбитальным взаимодействием из-за эффекта близости со сверхпроводником [7]. Для изучения этих эффектов можно исследовать транспортные свойства отдельного сверхпроводящего контакта к 2DEG (двумерный электронный газ) со спин-орбитальным взаимодействием.

Другим интересным типом гибридных структур являются системы с ферромагнитными контактами. Как и сверхпроводники ферромагнетики обладают

макроскопическим параметром порядка. Ферромагнитные контакты позволяют осуществлять инжектирование и детектирование спин-поляризованных электронов в двумерную электронную систему. Таким образом открываются возможности по изучению спиновых эффектов в 2DEG. Например, можно исследовать спиновый эффект Холла, который проявляется, как возникновение спиновой поляризации по краям образца, вызванное электрическим полем в двумерной электронной системе с сильным спин-орбитальным взаимодействием [8].

Кроме того возможность инжектирования и детектирования спин-поляризованных носителей, предоставляемая ферромагнитными контактами, интересна для изучения состояния топологического изолятора в HgTe квантовых ямах. Ключевой особенностью этого состояния, является присутствие геликоидальных краевых состояний, т.е. состояний с противоположными спинами, распространяющихся навстречу друг-другу вдоль края 2DEG [6]. В настоящее время имеется значительное количество экспериментальных работ, посвященных транспорту заряда вдоль геликоидальных краевых состояний, но практически отсутствуют работы по изучению переноса спина [9].

На самом деле помимо влияния контакта с макроскопическим параметром порядка на спектр 2DEG, можно ожидать и влияние спин-орбитального взаимодействия в 2DEG на свойства контакта. Например, при транспорте между сверхпроводником и двумерной системой со спин-орбитальным взаимодействием можно ожидать подавление андреевского отражения, поскольку спин-орбитальное взаимодействие влияет на образование куперовских пар в области контакта [7]. В случае ферромагнитного контакта, спин-поляризованный транспорт через F-2DEG (ферромагнетик - двумерный электронный газ) интерфейс может определять динамику намагниченности ферромагнитного контакта [10], например за счет переноса спинового момента [11].

**Основной целью** данной работы было исследование транспорта между двумерной электронной системой со спин-орбитальным взаимодействием и металлом с макроскопическим параметром порядка. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Изготовлены образцы на основе гетероструктур с  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  и  $HgTe$  квантовыми ямами со сверхпроводящими (Nb или NbN) и ферромагнит-

ными (пермаллой) контактами

2. Разработана и протестирована схема измерения транспортных характеристик отдельного контакта к двумерной электронной системе
3. Исследованы транспортные свойства отдельных сверхпроводящего (Nb) и ферромагнитного контакта к двумерной электронной системе в 20 нм  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой яме
4. Исследованы транспортные свойства отдельного сверхпроводящего (NbN) контакта к гетероструктуре на основе  $HgTe$
5. При помощи ферромагнитных контактов исследован спин-поляризованный транспорт в двумерной электронной системе в  $HgTe$  квантовой яме

#### **Положения выносимые на защиту:**

1. При изучении транспорта через боковой сверхпроводящий контакт к двумерной электронной системе в  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой яме обнаружено подавление андреевского отражения в узкой области энергий. Это подавление проявляется в виде пика дифференциального сопротивления при нулевом напряжении. Универсальная ширина пика для разных образцов, его температурная эволюция и поведение в магнитном поле указывают на связь подавления андреевского отражения со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы, которое присутствует в исследуемой двумерной электронной системе. Формирование пика можно объяснить возникновением спиновой поляризации 2DEG вблизи углов контакта из-за спинового эффекта Холла.
2. Экспериментально исследован электронный транспорт через интерфейс между ферромагнетиком (пермаллой) и краем двумерной электронной системы в  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой яме с сильным спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы. Обнаружен сильно нелинейный транспорт при околонулевых напряжениях при температуре меньше 1 К. Эта нелинейность полностью подавляется выше некоторых значений температуры, маг-

нитного поля или тока через интерфейс. Такое поведение может быть вызвано аккумуляцией спиновой поляризации на интерфейсе из-за спинового эффекта Холла и перемагничиванием ферромагнетика спин-поляризованным током.

3. Проведено экспериментальное исследование транспорта через интерфейс между сверхпроводником и двумерной электронной системой с инверсией зон. Интерфейс реализован в виде бокового туннельного контакта из NbN к краю 8 нм HgTe квантовой ямы. Контакт демонстрирует андреевское поведение с конечным сопротивлением в сверхпроводящей щели. К большому удивлению, проводимость внутри щели модулирована равноудаленными по напряжению осцилляциями. Они присутствуют только при напряжениях  $|eV| \leq \Delta_{NbN}$  при температурах меньших 1 К. Осцилляции исчезают при введении нормального к 2DEG магнитного поля. В параллельном магнитном поле, напротив, осцилляции присутствуют вплоть до максимального достижимого магнитного поля 14 Тл, при этом их период лишь немного уменьшается. Наблюдаемые осцилляции связаны с предсказанной в работе [12] интерференцией в геликоидальных краевых состояниях из-за эффекта близости со сверхпроводником.
4. Экспериментально исследован транспорт спин-поляризованных электронов между парой ферромагнитных контактов к границе двумерной электронной системы с инверсией зон. Двумерная система находится в узкой (8 нм) HgTe квантовой яме, ферромагнитные контакты сделаны из предварительно намагниченной пермаллоевой пленки. В нулевом магнитном поле наблюдается значительный вклад краевого тока в транспорт между ферромагнитными контактами. Экспериментально продемонстрировано, что этот транспорт чувствителен к взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных контактов, расположенных на расстоянии 200 мкм. Таким образом получено экспериментальное подтверждение спиновой когерентности краевого транспорта на макроскопические расстояния, что подтверждает геликоидальную природу краевых состояний.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается воспроизво-

димостью наблюдавшихся результатов на различных образцах и совпадением получаемых результатов в предельных режимах с существующими теориями.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: 56-я научная конференция МФТИ, Черноголовка, 2013; XVIII международный симпозиум «Нанопизика и Наноэлектроника», Нижний Новгород, 2014; Landau days 2014, Черноголовка; Fundamentals of Electronic Nanosystems «NanoPeter-2014», Санкт-Петербург; Пятая всероссийская молодёжная научная школа «Прикладные математика и физика: от фундаментальных исследований к инновациям», Долгопрудный, 2014; 6-ая Всероссийская конференция молодых ученых "Микро-, нанотехнологии и их применение" имени Ю. В. Дубровского, Черноголовка 2014; XIX международный симпозиум «Нанопизика и Наноэлектроника», Нижний Новгород, 2015; International workshop: Localization, Interactions and Superconductivity, Черноголовка, 2015; XII Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники-2015», Ершово. Кроме того результаты обсуждались на следующих научных семинарах: "Физика низких температур" и "Сверхпроводимость" ИФТТ РАН, семинары сектора квантовой мезоскопии ИТФ им. Ландау, семинар в ФИАН, семинар в Курчатовском институте, семинар по физике конденсированного состояния физического факультета МГУ.

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в постановке задач, изготовлении образцов, разработке экспериментальной методики, проведении измерений, обработке полученных результатов и их осмыслении, а также в подготовке статей к публикации.

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 4 статьях [A1, A2, A3, A4].

**Структура и объем диссертацию.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и библиографии. Полный объем диссертации составляет 97 страниц, на которых представлены 23 рисунка. Список литературы содержит 100 наименований.

# Содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, обозначены научная новизна и значимость работы, приведены защищаемые положения, и указаны степень их достоверности и уровень апробации.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященной исследуемым в диссертации проблемам. В частности первый раздел посвящен краткому рассмотрению спин-орбитального взаимодействия. Во втором разделе рассматриваются экспериментальные и теоретические работы по исследованию спинового эффекта Холла. Третий и четвертый разделы посвящены состоянию квантового спинового эффекта Холла и основным работам по его изучению в двумерных системах в квантовых ямах  $HgTe$ . Пятый раздел данной главы посвящен андреевскому отражению.

Во второй главе описывается методология данной работы. В первом разделе представлена методика низкотемпературных измерений в магнитном поле. Измерения проводились на криостате растворения, снабженном сверхпроводящим соленоидом. Он позволяет проводить измерения при температуре от 30 мК до 1.2 К в магнитном поле до 14 Тл. Во втором разделе подробно рассматривается использованная измерительная схема с обоснованием ее выбора. При исследовании транспортных свойств одиночного контакта использовалась трехточечная схема: изучаемый контакт заземляется, а два других используются для задачи тока и измерения напряжения. Задавая в такой схеме вместе с постоянным током модулирующий переменный, можно получить зависимость  $dV/dI(V)$  заземленного контакта.

Третий раздел описывает процесс изготовления образцов на основе гетероструктур с  $InGaAs$  и  $HgTe$  квантовыми ямами. Гетероструктура с 20 нм  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой ямой интересна наличием сильного спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы [13]. Кроме того важной особенностью данной структуры является возможность изготовления качественного контакта к 2DEG без специальной процедуры вжигания. Для этого достаточно напылить металл с перекрытием границы мезы. Данная особенность позволяет использовать кон-



такты из тугоплавких материалов. Гетероструктура с 8 нм  $HgTe$  квантовой ямой интересна инверсией зон, которая приводит к возникновению геликоидальных краевых состояний. Как и к предыдущей структуре здесь возможно изготовление контактов к краю 2DEG без вжигания. В работе использовались Nb и пермаллоевые контакты в структуре с  $InGaAs$ , и NbN и пермаллоевые контакты к структуре с  $HgTe$ . Контакты изготавливались при помощи магнетронного распыления.

В третьей главе описываются измерения транспортных свойств отдельного сверхпроводящего контакта к двумерной электронной системе со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы. В качестве основы для образцов использовалась гетероструктура с 20 нм  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой ямой. Сверхпроводящие контакты изготовлены из Nb, при помощи магнетронного распыления с перекрытием границы мезы. Кроме того образец имел вспомогательные омические контакты из Ni-Au. Для получения транспортных характеристик сверхпроводящего контакта использовалась трехточечная схема измерений. Похожие результаты были получены на разных образцах в нескольких циклах охлаждения. Основные результаты опубликованы в работе [A1].

В первом разделе представлены полученные экспериментальные результаты. Приведены зависимости  $dV/dI(V)$  дифференциального сопротивления одиночных сверхпроводящих контактов от падения напряжения на них при температуре 30 мК, см. рис. 1. Все они демонстрируют конечное сопротивление при напряжениях в сверхпроводящей щели ( $|eV| < \Delta_{Nb}$ ), соответствующей критической температуре  $T_c = 9.5$  К. При больших напряжениях  $dV/dI$  приближаются к нормальному сопротивлению. Полученные кривые имеют вид характерный для андреевского отражения при наличии потенциального барьера на интерфейсе. Проводимость частично подавлена внутри узкой области центрального пика дифференциального сопротивления при малых напряжениях. Ширина пика  $\approx 2$  мВ одинакова для всех контактов, во всех циклах охлаждения. Зависимость  $dV/dI(V)$  симметрична по напряжению.

В данном разделе представлена эволюция зависимости  $dV/dI(V)$  при повышении температуры. Пик в дифференциальном сопротивлении при малых напряжениях полностью исчезает к 0.88 К, при этом остальная зависимость не

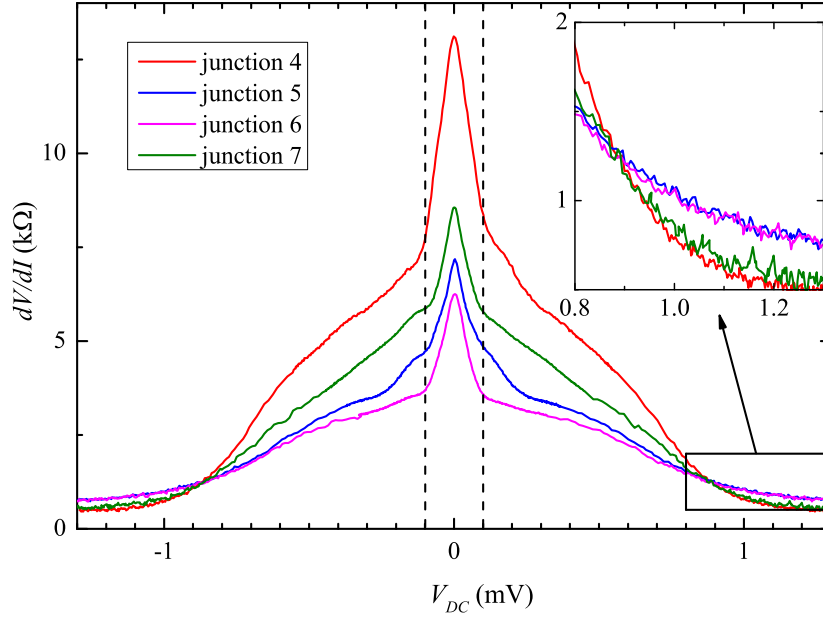


Рис. 1: Дифференциальное сопротивление  $dV/dI$  одиночного сверхпроводящего контакта в зависимости от падения напряжения на нем. Вставка демонстрирует различие в нормальном сопротивлении сверхпроводящих контактов на границах мезы с разной ориентацией.

изменяется до 1.2 К.

Кроме того в первом разделе представлена эволюция зависимости  $dV/dI(V)$  при введении магнитного поля в плоскости двумерной электронной системы. Магнитное поле полностью подавляет нелинейность  $dV/dI(V)$  к 3 Тл. При этом центральный пик более чувствителен к магнитному полю, он полностью подавляется к 1.5 Тл.

Во втором разделе обсуждаются возможности объяснения наблюдаемого поведения экспериментальных зависимостей  $dV/dI(V)$ . Кривые при температуре 0.88 К, на которых подавлен центральный пик дифференциального сопротивления, соответствуют предсказаниям ВТК-теории для SN-контакта при наличии небольшого потенциального барьера на интерфейсе. Ширина области пика сопротивления по напряжению, температурная зависимость и поведение в магнитном поле свидетельствуют в пользу того, что пик связан с сильным спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы в исследуемой двумерной электронной системе. Появление пика дифференциального сопротивления вызвано возникновением областей спиновой поляризации в 2DEG вблизи контакта из-за

спинового эффекта Холла. Андреевский транспорт из областей спиновой поляризации затруднен, что приводит к эффективному уменьшению ширины контакта и росту сопротивления.

В третьем разделе излагаются основные выводы данной главы.

Четвертая глава посвящена изучению транспорта в 2DEG со спин-орбитальным взаимодействием в  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой яме через ферромагнитные контакты. Образцы имели несколько омических контактов из Ni-Au и несколько ферромагнитных контактов из пермаллоя. Пермаллоевые контакты обладали намагниченностью параллельной плоскости 2DEG. Основные результаты опубликованы в работе [A2].

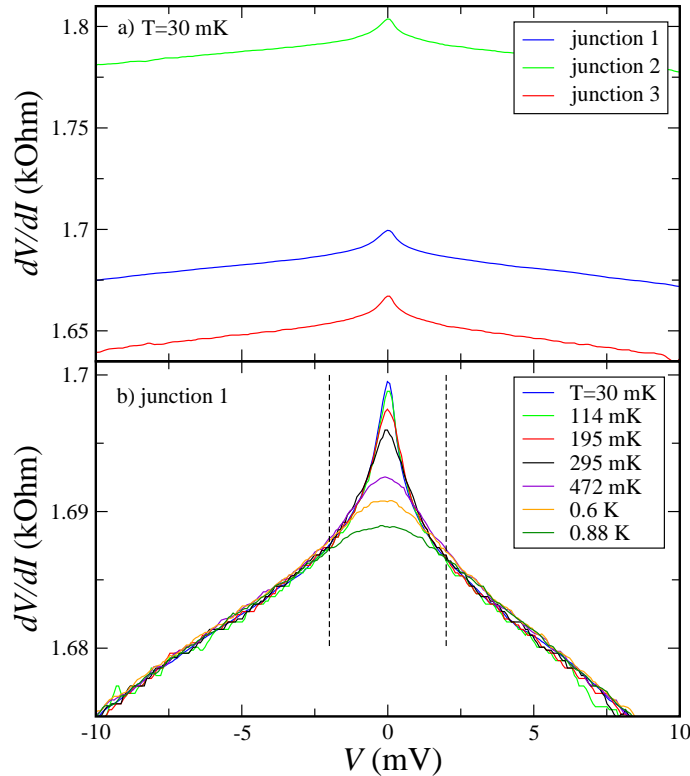


Рис. 2: (а) Дифференциальное сопротивление  $dV/dI$  одиночного F-2DEG контакта в зависимости от падения постоянного напряжения на контакте. (б) Эволюция зависимости  $dV/dI(V)$  одиночного F-2DEG контакта при повышении температуры.

В первом разделе изучается транспорт через отдельный ферромагнитный контакт. Данный раздел состоит из двух подразделов.

В первом подразделе приводятся полученные экспериментальные зависимо-

сти. На рисунке 2(a) представлены зависимости дифференциального сопротивления от напряжения для разных контактов на одном из образцов, все зависимости имеют схожий вид. Они отличаются только сдвигом на постоянную не зависящую от падения напряжения на контакте величину. Амплитуды сдвига, полученные для разных контактов в нескольких сериях измерений, не коррелируют с положением контакта на границе мезы. Зависимости  $dV/dI(V)$  демонстрируют сильно нелинейное поведение, которое показано более подробно на рисунке 2(b). График немного не симметричен относительно нулевого напряжения, при этом он характеризуется строго линейной зависимостью  $dV/dI(V)$  везде кроме узкой области около нулевого напряжения. Нелинейность полностью подавляется при повышении температуры до 0.88 К, при этом линейные области зависимости  $dV/dI(V)$  не изменяются, см. рис. 2(b). Также изучались транспортные свойства в магнитном поле. Нелинейность зависимости  $dV/dI(V)$  подавляется магнитным полем параллельным плоскости 2DEG к 2 Тл, а нормальным полем к 0.67 Тл.

Второй подраздел посвящен обсуждению механизма возникновения наблюдаемых зависимостей  $dV/dI(V)$ . Интересной особенностью полученных зависимостей является область нелинейности в окрестности нулевого напряжения. Температурная эволюция и поведение в параллельном магнитном поле говорят о том, что нелинейность вызвана спин-орбитальным взаимодействием. Наблюдаемые данные хорошо объясняются при помощи спинового эффекта Холла, который ожидается в двумерных системах со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы. Спиновый эффект Холла приводит к возникновению областей со спиновой поляризацией нормальной к плоскости 2DEG вблизи краев контакта. Поскольку пермаллоевые контакты имеют исходную намагниченность в плоскости 2DEG, транспорт из областей спиновой поляризации затруднен, что приводит к возникновению нелинейности вблизи нулевого напряжения. Исчезновение осцилляций в перпендикулярном магнитном поле связано с перемагничиванием пермаллоевых контактов.

Второй раздел приводит данные по транспорту между парой пермаллоевых контактов. Приведено сравнение транспорта между парой ферромагнитных контактов на разных расстояниях (больше и меньше длины свободного пробега в

2DEG) в параллельном и перпендикулярном поле. Эти данные дополнительно подтверждают, что наблюдаемая для одиночного контакта нелинейность зависимости  $dV/dI(V)$  определяется свойствами F-2DEG интерфейса.

В третьем разделе изложены основные результаты данной главы.

В пятой главе описываются исследования транспортных свойств одиночного сверхпроводящего контакта к  $HgTe$  квантовой яме. В работе использовалась гетероструктура с толщиной квантовой ямы 8 нм, 2DEG в которой характеризуется инверсией зон и наличием геликоидальных краевых состояний. Сверхпроводящие контакты изготовлены при помощи магнетронного напыления пленки NbN на границу мезы. Образцы имели несколько омических контактов. Измерения проводились при температуре 30 мК - 1.2 К, в магнитных полях до 14 Тл. Основные результаты опубликованы в работе [А3]

В первом разделе представлены полученные экспериментальные данные. Сверхпроводящие контакты обладают высоким сопротивлением порядка единиц МОм, сопротивление в сверхпроводящей щели остается конечным при минимальной температуре. В целом вид зависимости  $dV/dI(V)$  соответствует ВТК-теории при наличии незначительного барьера на интерфейсе. При температуре 30 мК в области сверхпроводящей щели на зависимости  $dV/dI(V)$  имеются осцилляции. Они полностью подавляются при повышении температуры до 0.88 К, при этом форма кривой не изменяется. Осцилляции лучше всего видны при построении зависимости  $\delta(dV/dI)$  от  $V$ , которая получается при вычитании из низкотемпературной кривой зависимости, полученной при 0.88 К. Осцилляции имеются только в области  $|eV| < \Delta_{NbN}$ , они имеют максимум при нулевом напряжении и постоянное расстояние между экстремумами. Кроме того, изучались транспортные свойства сверхпроводящих контактов в магнитном поле. Нормальное к плоскости 2DEG поле подавляет осцилляции к 2 Тл. Параллельное плоскости 2DEG магнитное поле не подавляет осцилляции до 14 Тл, но в больших полях период осцилляций немного уменьшается.

Второй раздел посвящен интерпретации полученных экспериментальных зависимостей. Во-первых, обсуждается несоответствие между значительным сопротивлением сверхпроводящих контактов и их высокой прозрачностью (коэффициент одночастичного туннелирования из ВТК-контакта  $\mathcal{T} \sim 0.16$ ). Данное

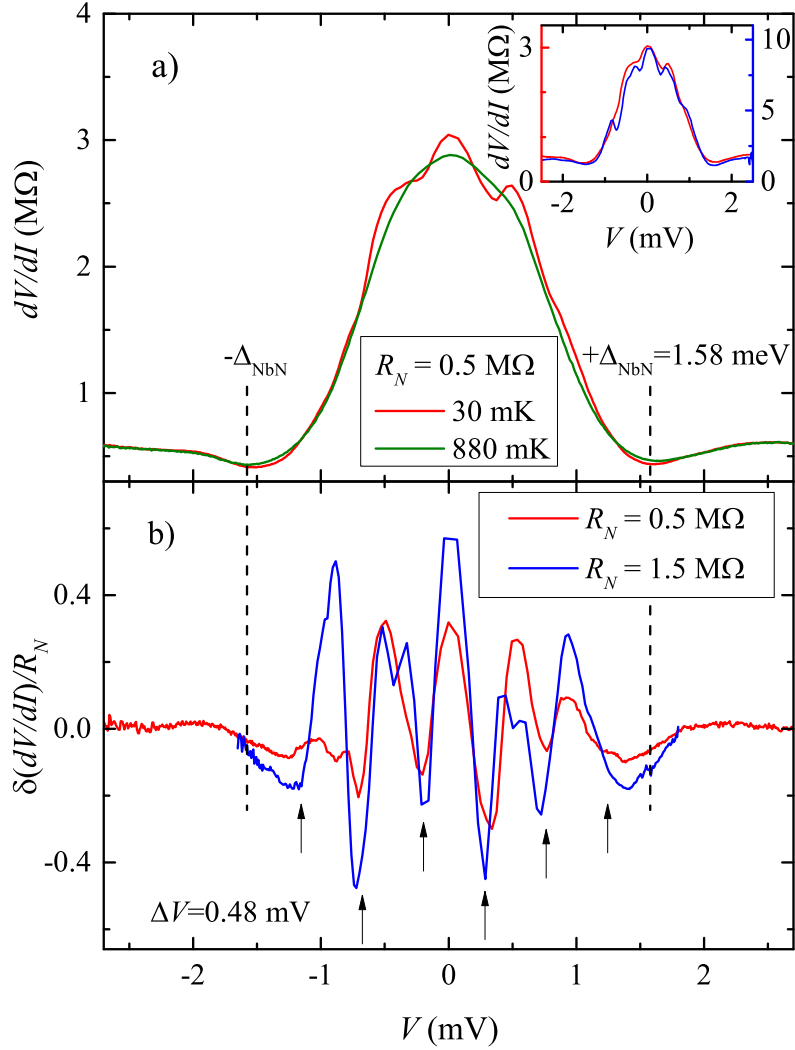


Рис. 3: (a) Примеры зависимостей  $dV/dI(V)$  для транспорта через боковой NbN контакт в нулевом магнитном поле для двух различных температур  $T \ll T_c = 11$  К. Пунктирными линиями обозначена сверхпроводящая щель  $\Delta_{NbN}$ . На кривой, соответствующей  $T = 30$  мК, видны осцилляции дифференциального сопротивления при  $|eV| < \Delta_{NbN}$ . Осцилляции подавляются при температуре выше 0.88 К, при этом общая форма зависимости не изменяется. (b) Разница между зависимостями  $dV/dI(V)$  при температурах  $T = 30$  мК и  $T = 0.88$  К, нормированная на нормальное сопротивление  $R_N$ , для двух контактов с различными значениями сопротивления ( $R_N = 0.5$  МОм и  $R_N = 1.5$  МОм). Положения осцилляций обозначены стрелками, они хорошо совпадают для разных  $R_N$ . Период осцилляций  $\Delta V = 0.48$  мВ.

поведение связано с присутствием краевых состояний на границе двумерной электронной системы. Во-вторых, в разделе обсуждается механизм формирования периодических осцилляций дифференциального сопротивления в области

сверхпроводящей щели. Такие осцилляции нетипичны для одиночного сверхпроводящего контакта. Наиболее вероятной причиной их возникновения является образование области индуцированной сверхпроводимости в геликоидальном краевом состоянии и интерференции на границах этой области, как было предсказано теоретически в работе [12].

В третьем разделе излагаются основные выводы данной главы.

**Шестая глава** посвящена изучению спин-поляризованного транспорта через двумерную электронную систему в 8 нм  $HgTe$  квантовой яме. Для задачи поляризованного тока использовались ферромагнитные контакты, полученные напылением пермаллоя с перекрытием границы мезы. Основные результаты опубликованы в работе [A4].

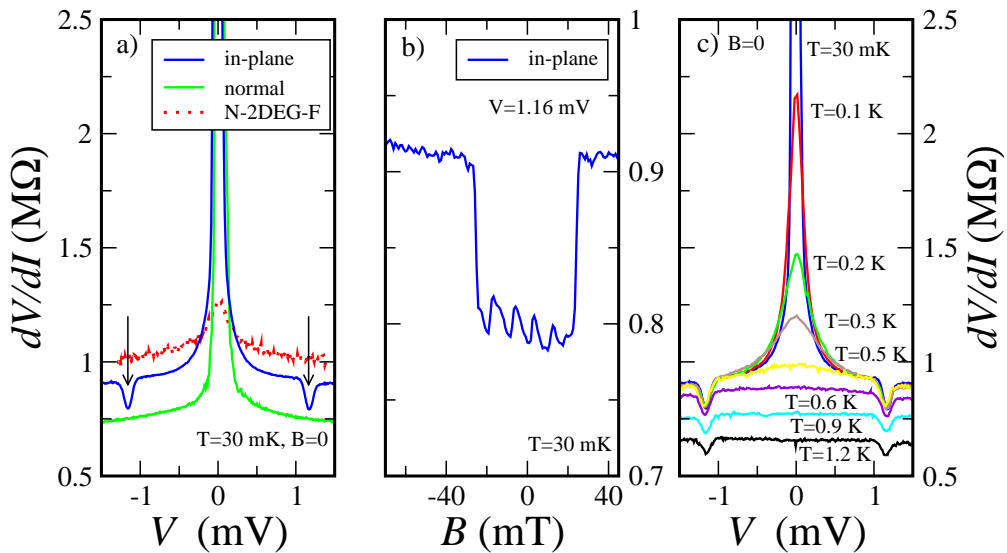


Рис. 4: (а) Зависимости  $dV/dI(V)$  для транспорта между парой ферромагнитных контактах при различных направлениях намагниченности и при транспорте между ферромагнитным и нормальным контактами. При транспорте между ферромагнитными контактами с параллельной 2DEG намагниченностью наблюдаются узкие провалы в дифференциальном сопротивлении при  $V = \pm 1.16$  мВ. (б) Подавление пиков дифференциального сопротивления магнитным полем. При  $|B| < 25$  мТл на зависимости  $dV/dI(B)$  имеются воспроизводимые осцилляции с периодом  $\Delta B \approx 10$  мТл. (с) Эволюция зависимости  $dV/dI(V)$  для транспорта между парой ферромагнитных контактов, с намагниченностью в плоскости 2DEG, при повышении температуры.

В первом разделе представляются полученные экспериментальные результаты. При транспорте между парой ферромагнитных контактов зависимость

$dV/dI(V)$  характеризуется наличием узкого пика сопротивления при нулевом напряжении и линейных ветвей при больших напряжениях, см. рис. 4(а). Пик не зависит от направления намагниченности контактов. Однако основной интерес представляют узкие провалы дифференциального сопротивления при  $V \approx \pm 1.16$  мВ, которые наблюдаются при транспорте между парой ферромагнитных контактов с намагниченностью параллельной плоскости 2DEG. Эти особенности исчезают, если вместо любого из ферромагнитных контактов использовать немагнитный омический контакт или если изменить намагниченность ферромагнитных контактов на перпендикулярную плоскости 2DEG. Как видно из рисунка 4(с) данные провалы в  $dV/dI$  слабо чувствительны к температуре до 1 К, но подавляются слабым магнитным полем. Для изучения поведения провалов в магнитном поле был задан ток, соответствующий напряжению  $V \approx \pm 1.16$  мВ, и введено магнитное поле параллельное плоскости 2DEG. Получившаяся зависимость, представленная на рисунке 4(с), демонстрирует подавление провалов при  $B \geq 25$  мТл, при этом в меньших полях наблюдаются воспроизводимые осцилляции дифференциального сопротивления с периодом 10 мТл.

Во втором разделе обсуждается механизм формирования провалов в дифференциальном сопротивлении и его значение. Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что транспорт между парой ферромагнитных контактов чувствителен к взаимной ориентации их намагниченностей. Что является экспериментальным свидетельством наличия спиновой когерентности при транспорте на макроскопические расстояния ( $\sim 200$  мкм). При этом полученные результаты позволяют полагать, что эта когерентность обеспечивается геликоидальными краевыми состояниями.

В третьем разделе излагаются основные выводы данной главы.

В заключении сформулированы основные результаты данной работы, которые заключаются в следующем:

1. При изучении транспорта через боковой сверхпроводящий контакт к двумерной электронной системе в  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой яме обнаружено подавление андреевского отражения в узкой области энергий. Это подавление проявляется в виде пика дифференциального сопротивления при



нулевом напряжении. Универсальная ширина пика для разных образцов, его температурная эволюция и поведение в магнитном поле указывают на связь подавления андреевского отражения со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы, которое присутствует в исследуемой двумерной электронной системе. Формирование пика можно объяснить возникновением спиновой поляризации 2DEG вблизи углов контакта из-за спинового эффекта Холла.

2. Экспериментально исследован электронный транспорт через интерфейс между ферромагнетиком (пермаллой) и краем двумерной электронной системы в  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  квантовой яме с сильным спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы. Обнаружен сильно нелинейный транспорт при околонулевых напряжениях при температуре меньше 1 К. Эта нелинейность полностью подавляется выше некоторых значений температуры, магнитного поля или тока через интерфейс. Такое поведение может быть вызвано аккумуляцией спиновой поляризации на интерфейсе из-за спинового эффекта Холла и перемагничиванием ферромагнетика спин-поляризованным током.
3. Проведено экспериментальное исследование транспорта через интерфейс между сверхпроводником и двумерной электронной системой с инверсией зон. Интерфейс реализован в виде бокового туннельного контакта из NbN к краю 8 нм HgTe квантовой ямы. Контакт демонстрирует андреевское поведение с конечным сопротивлением в сверхпроводящей щели. К большому удивлению, проводимость внутри щели модулирована равноудаленными по напряжению осцилляциями. Они присутствуют только при напряжениях  $|eV| \leq \Delta_{NbN}$  при температурах меньших 1 К. Осцилляции исчезают при введении нормального к 2DEG магнитного поля. В параллельном магнитном поле, напротив, осцилляции присутствуют вплоть до максимального достижимого магнитного поля 14 Тл, при этом их период лишь немного уменьшается. Наблюдаемые осцилляции связаны с предсказанной в работе [12] интерференцией в геликоидальных краевых состояниях из-за эффекта близости со сверхпроводником.

4. Экспериментально исследован транспорт спин-поляризованных электронов между парой ферромагнитных контактов к границе двумерной электронной системы с инверсией зон. Двумерная система находится в узкой (8 нм) HgTe квантовой яме, ферромагнитные контакты сделаны из предварительно намагниченной пермаллоевой пленки. В нулевом магнитном поле наблюдается значительный вклад краевого тока в транспорт между ферромагнитными контактами. Экспериментально продемонстрировано, что этот транспорт чувствителен к взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных контактов, расположенных на расстоянии 200 мкм. Таким образом получено экспериментальное подтверждение спиновой когерентности краевого транспорта на макроскопические расстояния, что подтверждает геликоидальную природу краевых состояний.

## Публикации автора по теме диссертации

- [A1] Kononov, A. Andreev reflection at the edge of a two-dimensional electron system with strong spin-orbit coupling / A. Kononov, G. Biasiol, L. Sorba, and E. V. Deviatov // JETP Lett. — 2013 — Vol. 98 — Iss. 7 — pp. 421-426.
- [A2] Kononov, A. Current-induced magnetization dynamics at the edge of a two-dimensional electron system with strong spin-orbit coupling / A. Kononov, S.V. Egorov, G. Biasiol, L. Sorba, and E.V. Deviatov // Phys. Rev. B — 2014 — Vol. 89 — Iss. 7 — p. 075312.
- [A3] Kononov, A. Conductance oscillations at the interface between a superconductor and the helical edge channel in a narrow HgTe quantum well / A. Kononov, S.V. Egorov, N. Titova, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, E.V. Deviatov // JETP Lett. — 2015 — Vol. 101 — Iss.1 — pp. 41-46.
- [A4] Kononov, A. Evidence on the macroscopic length scale spin coherence for the edge currents in a narrow HgTe quantum well / A. Kononov, S.V. Egorov, Z.D.

Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, E.V. Deviatov // JETP Lett. — 2015 — Vol. 101 — Iss. 12 — pp. 814-819.

## Список литературы

- [1] Jungwirth, T. Spin Hall effect devices / T. Jungwirth, J. Wunderlich and K. Olejnik // Nature Materials — 2012 — Vol. 11 — pp. 382–390.
- [2] Alicea, J. New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems / J. Alicea // Rep. Prog. Phys. — 2012 — Vol. 75 — No. 7 — p. 076501.
- [3] Beenakker, C.W.J. Search for Majorana Fermions in Superconductors / C.W.J. Beenakker // Annu. Rev. Con. Mat. Phys. — 2013 — Vol. 4 — pp. 113 - 136.
- [4] Fu, L. Superconducting Proximity Effect and Majorana Fermions at the Surface of a Topological Insulator / L. Fu and C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. — 2008 — Vol. 100 — Iss. 9 — p. 96407.
- [5] Bernevig, B.A. Quantum Spin Hall Effect and Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells / B.A. Bernevig, T.L. Hughes, and S.-C. Zhang // Science — 2006 — Vol. 314 — No. 5806 — pp. 1757-1761.
- [6] Konig, M. Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells / M. Konig, S. Wiedmann, C. Brune, A. Roth, H. Buhmann, L. Molenkamp, X.-L. Qi, and S.-C. Zhang // Science — 2007 — Vol. 318 — No. 5851 — pp. 766-770.
- [7] Yokoyama, T. Charge transport in two-dimensional electron gas/insulator/superconductor junctions with Rashba spin-orbit coupling / T. Yokoyama, Y. Tanaka, and J. Inoue // Phys. Rev. B — 2006 — Vol. 74 — Iss. 3 — p. 035318.
- [8] Mishchenko, E.G. Spin Current and Polarization in Impure Two-Dimensional Electron Systems with Spin-Orbit Coupling / E.G. Mishchenko, A.V. Shytov, and B.I. Halperin // Phys. Rev. Lett. — 2004 — Vol. 93 — Iss. 22 — p. 226602.

- [9] Brune, C. Spin polarization of the quantum spin Hall edge states / C. Brune, A. Roth, H. Buhmann, E.M. Hankiewicz, L.W. Molenkamp, J. Maciejko, X.-L. Qi and S.-C. Zhang // Nature Physics — 2012 — Vol. 8 — pp. 485-490.
- [10] Adagideli, I. Detection of Current-Induced Spins by Ferromagnetic Contacts / I. Adagideli, G. E. W. Bauer, and B. I. Halperin // Phys. Rev. Lett. — 2006 — Vol.97 — Iss. 25 — p. 256601.
- [11] Slonczewski, J.C. Current-driven excitation of magnetic multilayers / J.C. Slonczewski // J. Magn. Magn. Mater. — 1996 — Vol. 159 — Iss. 1–2 — pp. L1–L7.
- [12] Adroguer, P. Probing the helical edge states of a topological insulator by Cooper-pair injection / P. Adroguer, C. Grenier, D. Carpentier et al. // Phys. Rev. B — 2010 — Vol. 82 — Iss. 8 — p. 081303(R).
- [13] Holmes, S.N. Bychkov–Rashba dominated band structure in an  $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ – $In_{0.75}Al_{0.25}As$  device with spin-split carrier densities of  $< 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  / S.N. Holmes, P.J. Simmonds, H.E. Beere, F. Sfigakis, I. Farrer, D.A. Ritchie, and M. Pepper // J. Phys.: Condens. Matter — 2008 — Vol. 20 — No. 47 — pp. 472207.