

На правах рукописи

КУДРЯВЦЕВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СПИНОЗАВИСИМЫЙ ТРАНСПОРТ ДЫРОК В
НАНОСТРУКТУРАХ
СВЕРХПРОВОДНИК-ПОЛУПРОВОДНИК-СВЕРХПРОВОДНИК**

специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор
Баграев Николай Таймуразович
Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Баранов Павел Георгиевич
Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Доктор физико-математических наук, профессор
Соломонов Александр Васильевич
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет

Защита состоится «17» июня 2010 г. в 16.30 на заседании диссертационного
совета Д 002.205.01 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан «12» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Петров А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Самоупорядоченные полупроводниковые наноструктуры интенсивно исследуются в последние годы в связи с задачами создания принципиально новых приборов нанoeлектроники и оптоэлектроники, таких как транзисторы на одиночных электронах, одноэлектронные ячейки памяти и лазеры на внутризонных переходах. Причем, главные усилия в развитии данного направления концентрируются на разработках нанотехнологий, основанных на процессах локального самоупорядочения как атомов матрицы [1,2], так и легирующих примесей [3,4]. Полученные с помощью этих технологий самоупорядоченные полупроводниковые квантовые ямы, проволоки и точки не только используются в качестве базовых элементов в приборах нанoeлектроники, но и являются модельными объектами физики мезоскопических систем [5].

С другой стороны, одним из важнейших направлений нанофизики и нанoeлектроники является изучение и применение наноразмерных джозефсоновских переходов. Различные версии этих структур могут найти широкое применение в новом направлении нанoeлектроники – спинтронике, в рамках которого реализуются устройства, основанные не на транспорте электронов и дырок, а на пространственном изменении проекций их спинов. Основное внимание в рамках данного направления уделяется созданию так называемых гибридных систем или сэндвичей, составляющими которых являются сверхпроводники с тонкими прослойками нормальных металлов, а в последнее время – полупроводниковых наноструктур. Характеристики наноразмерных сэндвичей определяются сверхпроводящим эффектом близости [6] и проявляются наиболее ярко, когда длина когерентности сравнима с длиной волны Ферми, и обе они больше ширины полупроводниковой наноструктуры между двумя сверхпроводниками [7,8].

Эффект близости настолько хорошо известен в сверхпроводимости, что стал частью стандартной терминологии. Основной вывод ранних работ по данному вопросу [9] основывается на заключении, что если напылить нормальный металл на поверхность сверхпроводника, и контакт между ними будет хорошего качества, то пара Купера может свободно проникнуть из сверхпроводника в нормальный металл. В некоторых случаях требовался более детальный анализ, особенно это касалось исследований двойных слоев нормальный металл-сверхпроводник [10], которые появились у исследователей благодаря стандартной ниобиевой технологии [11]. И только использование современных методик исследования транспорта в мезоскопических системах показало, что андреевское отражение и эффект близости внутренне взаимосвязаны [7,8]. Поэтому необходимо

рассматривать результаты исследований эффекта близости с точки зрения перспектив их возможного анализа в рамках андреевского отражения. Следует выделить три этапа развития физики нано–сандвичей типа сверхпроводник–полупроводник–сверхпроводник. Во-первых, в 80-х годах значительное число данных было получено по квантовому когерентному транспорту в разупорядоченных несверхпроводящих системах. Была разъяснена роль, которую играет таулессовская длина и длина неупругого рассеяния. Были изучены проводники, длина которых настолько мала, что ее превышает фермиевская длина волны. Решающую роль играет фаза одиночной частицы и корреляция между носителями тока в разупорядоченных системах. Во-вторых, были проведены различные эксперименты, в которых исследовалось распространение сверхпроводящих свойств на субмикронный уровень, и создавались объекты меньше характеристической длины. В-третьих, были сделаны различные успешные попытки заполнить пробел между строгим теоретическим представлением в рамках квазиклассических уравнений и более доступным концептуальным описанием, основанным на матрицах перехода, которые помогают экспериментаторам в разработке и интерпретации экспериментов.

Тем не менее, наиболее важными представляются исследования в направлении использования в качестве элементов нано–сандвичей высокотемпературных сверхпроводников, а также сверхузких кремниевых квантовых ям, которые могут быть реализованы в рамках планарной кремниевой технологии. В этом случае открываются возможности для исследований мезоскопических явлений при высоких температурах.

Вышесказанное определяет актуальность темы настоящей работы, которая была сконцентрирована на экспериментальных исследованиях характеристик сандвич–структур типа высокотемпературный сверхпроводник – кремниевая квантовая яма – высокотемпературный сверхпроводник. Основное внимание в ходе проведения экспериментов уделялось изучению взаимосвязанности квантования проводимости и сверхтока соответственно при температурах выше и ниже критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние, которое проявлялось в характеристиках спинозависимого транспорта двумерных дырок.

Цель работы состояла в исследовании взаимосвязанности размерного квантования и квантования сверхтока в условиях спинозависимого транспорта дырок в сверхузких кремниевых квантовых ямах, ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами.

В задачи работы входило изучение следующих вопросов:

1. Исследование характеристик размерного квантования дырок в сверхузких кремниевых квантовых ямах (СККЯ) p -типа

- проводимости, ограниченных δ -барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кремния (100) n -типа.
2. Изучение электрических, оптических и магнитных свойств δ -барьеров, сильнолегированных бором, в зависимости от плотности дырок в СККЯ. Исследование взаимосвязанности характеристик центров бора и зонной структуры δ -барьеров.
 3. Исследование высокотемпературной сверхпроводимости в СККЯ p -типа, ограниченных δ -барьерами, сильнолегированными бором, с помощью температурных и полевых зависимостей удельного сопротивления, термо-эдс, теплоемкости и магнитной восприимчивости.
 4. Идентификация сверхпроводящей щели путем регистрации туннельных ВАХ, спектров локальной туннельной спектроскопии и спектров пропускания инфракрасного диапазона длин волн.
 5. Регистрация туннельных ВАХ в СККЯ p -типа проводимости, ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами, с целью обнаружения:
 - корреляций в квантовании сверхтока и квантованной проводимости, которые определяются туннелированием куперовских пар и одиночных дырок соответственно ниже и выше критической температуры сверхпроводящего перехода;
 - процессов многократного андреевского отражения двумерных дырок в СККЯ, которые обеспечивают микроскопический механизм, ответственный за сверхпроводящий эффект близости в сверхпроводящих кремниевых наноструктурах.
 6. Обнаружение и исследование ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла с помощью регистрации зависимостей продольной и поперечной проводимости в плоскости СККЯ от величины напряжения вертикального затвора, которые обусловлены спиновой поляризацией дырок в краевых каналах вследствие процессов многократного андреевского отражения.

Научная новизна работы.

1. Обнаружено, что сверхузкие кремниевые квантовые ямы (СККЯ) p -типа проводимости, ограниченные δ -барьерами, содержащими тригональные дипольные центры бора, на поверхности кремния (100) n -типа проявляют свойства квантоворазмерных структур сверхпроводник-полупроводник-сверхпроводник.
2. Обнаружены осцилляции второго критического поля и критической температуры сверхпроводящего перехода, которые возникают вследствие квантования сверхтока.

3. Показано, что квантование сверхтока в СККЯ p -типа проводимости, ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами, определяется позициями уровней размерного квантования дырок.
4. Обнаружено многократное андреевское отражение дырок, которое является ответственным за сверхпроводящий эффект близости в сверхпроводящих кремниевых наноструктурах.
5. Впервые исследованы ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла, возникающих вследствие спиновой поляризации дырок в условиях многократного андреевского отражения.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнительным анализом экспериментальных данных, полученных с помощью различных методик, а также их соответствием с имеющимися на сегодняшний день экспериментальными и теоретическими результатами изучения транспорта носителей тока в квантово-размерных структурах сверхпроводник-полупроводник-сверхпроводник.

Научная и практическая значимость диссертационного исследования определяется результатами обнаружения и тщательного изучения взаимосвязанности квантования проводимости и квантования сверхтока в джозефсоновских структурах δ -барьер–СККЯ– δ -барьер соответственно ниже и выше температуры сверхпроводящего перехода; изучением многократного андреевского отражения, которое приводит к спиновой поляризации дырок в краевых каналах СККЯ; исследованиями влияния кристаллографической ориентации дипольных центров бора, содержащихся в δ -барьерах, на характеристики спинозависимого транспорта дырок в СККЯ; результатами исследований относительного вклада многократного андреевского отражения и спин-орбитального взаимодействия Рашбы в формирование ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла.

Защищаемые положения:

1. Сверхузкие кремниевые квантовые ямы (СККЯ) p -типа проводимости, ограниченные δ -барьерами, содержащими тригональные дипольные центры бора, проявляют свойства квантово-размерных структур сверхпроводник-полупроводник-сверхпроводник.
2. Осцилляции сверхтока и осцилляции проводимости, обнаруженные при регистрации туннельных ВАХ соответственно ниже и выше критической температуры сверхпроводящего перехода, демонстрируют отсутствие фазового сдвига, что свидетельствует о взаимосвязанности квантования сверхтока и размерного квантования дырок в СККЯ, ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами.

3. Многократное андреевское отражение, обнаруженное в измерениях продольной проводимости и туннельных ВАХ высокого разрешения, приводит к спиновой поляризации двумерных дырок в соответствии с кристаллографической ориентацией тригональных дипольных центров бора в δ -барьерах, ограничивающих СККЯ p -типа проводимости.
4. Зависимости продольной и поперечной проводимости в плоскости СККЯ p -типа проводимости, ограниченной сверхпроводящими δ -барьерами, от величины напряжения вертикального затвора позволяют идентифицировать ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла, возникающие вследствие изменения спин-орбитального взаимодействия Рашбы в валентной зоне. В энергетическом интервале сверхпроводящей щели спин-орбитальное взаимодействие Рашбы проявляется в амплитудной модуляции многократного андреевского отражения, а вне ее – приводит к осцилляциям дырочной проводимости из-за спиновой прецессии поляризованных дырок в краевых каналах.

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 8-й Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2006); 11-ой Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям в рамках программы У.М.Н.И.К. (Санкт-Петербург, 2008); Конференции по физике и астрономии для молодых ученых СПб и Северо-запада (Санкт-Петербург, 2009); 9-й и 10-й Международных конференциях по нанофизике и нанотехнологии, ICN&T-9, ICN&T-10 (Базель, Швейцария, 2007, Стокгольм, Швеция, 2008); 17-й и 18-й Международных конференциях по электронным свойствам двумерных систем, EP2DS-17, EP2DS-18 (Генуя, Италия, 2007, Кобе, Япония, 2009); 5-й и 6-й Международных конференциях по квантовым вихрям в наноструктурированных сверхпроводниках, VORTEX-5, VORTEX-6 (Родос, Греция, 2007, 2009); 19-м Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2008); 29-й Международной конференции по физике полупроводников, ICPS-29 (Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2008); 25-й Международной конференции по физике дефектов в полупроводниках, ICDS-25 (Санкт-Петербург, 2009).

Публикации: по результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 7 публикаций в ведущих отечественных и международных журналах. Список публикаций приведен в конце диссертации.

Структура диссертации: Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определяется актуальность темы диссертационной работы, перечислены основные новые результаты, обосновывается их научная и практическая значимость, представлена структура диссертации и приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященный исследованию транспорта носителей тока в сэндвич–наноструктурах типа сверхпроводник-полупроводник-сверхпроводник, в которых в качестве квантоворазмерной прослойки используются гетероструктура Si-Ge [8] и углеродная нанотрубка [7].

В первом параграфе кратко рассматривается эффект близости, обусловленный проникновением куперовских пар из сверхпроводника в полупроводниковую наноструктуру, что по своей сути является следствием андреевского отражения между сверхпроводящими слоями [12].

Во втором параграфе представлены основные соотношения андреевского отражения, используемые для описания процессов на границе перехода сверхпроводник–нормальный металл. Показано, что андреевское отражение протекает внутри энергетического интервала сверхпроводящей щели $2\Delta(T)$. Кроме того, процесс преобразования нормального тока в сверхток происходит внутри области, соответствующей длине когерентности $\xi(T)$.

Третий параграф посвящен описанию процессов многократного андреевского отражения в сэндвичах типа сверхпроводник - полупроводниковая наноструктура - сверхпроводник при напряжениях смещения ниже энергии сверхпроводящей щели 2Δ . Показано, что квантование сверхтока определяется значениями энергий уровней размерного квантования. Причем вблизи каждого джозефсоновского пика сверхтока проявляется спектр пиков тока вследствие многократного андреевского отражения [7,8]. Важно отметить, что энергетические позиции пиков многократного андреевского отражения, V_n , находятся в строгом соответствии со значением их номера: $eV_n=2\Delta/n$, ($n=1,2,3,\dots$).

В четвертом параграфе обсуждается характерное соотношение между значением амплитуды квантованного сверхтока, I_c , в сверхпроводящем состоянии и величиной ступеньки в квантовой лестнице проводимости в нормальном состоянии сэндвич-наноструктуры, $G=(2e^2/h)T$, где T –коэффициент прохождения через двойной барьер. Данное соотношение, $I_c/G=\pi\Delta/e$, при условии идеальных границ раздела полупроводник-сверхпроводник приводит к выражению для кванта сверхтока, $2\pi\Delta e/h$ [10].

В конце главы формулируются **цель и задачи** диссертационной работы.

Во второй главе приведены результаты исследований электрических, оптических и магнитных свойств сверхузких кремниевых квантовых ям (СККЯ) *p*-типа проводимости на поверхности монокристаллического кремния (100) *n*-типа.

В первом параграфе рассматриваются возможности получения СККЯ с помощью прецизионного управления потоками вакансий и собственных междоузельных атомов, генерируемых границей раздела Si-SiO₂, что приводит к самоорганизации микродефектов на поверхности монокристаллического кремния. С помощью измерений угловых зависимостей циклотронного резонанса (ЦР), ЭПР, сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) было показано, что на начальной стадии окисления на поверхности кремния (100) формируются СККЯ, ограниченные двумерными слоями микродефектов, состоящих из собственных междоузельных атомов. Следует отметить, что фрактальное распределение микродефектов с минимальным размером 2 нм воспроизводится при дальнейшем окислении поверхности кремния (100). Несмотря на то, что как продольные, так и поперечные СККЯ, внедренные во фрактальную систему микродефектов, представляют большой интерес для использования в качестве основы оптически и электрически активных микрорезонаторов в опто- и наноэлектронике, присутствие оборванных связей на их границах является негативным фактором для практической реализации подобных структур. Поэтому, для пассивации оборванных связей и других дефектов, возникающих в процессе предварительного окисления подложек кремния (100), использовалась кратковременная диффузия бора, которая способствовала трансформации слоев микродефектов в нейтральные δ -барьеры, ограничивающие СККЯ. Проведенные исследования показали, что сильнолегированные бором, $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, δ -барьеры представляют собой чередующуюся последовательность нелегированных микродефектов и легированных квантовых точек с размерами 2 нм. Причем каждая легированная квантовая точка по данным ЭПР содержит два примесных атома бора, реконструированных в тригональный дипольный центр. В рамках предложенной модели, реконструкция мелких акцепторов бора, приводящая к образованию нейтральных дипольных центров, $2B^0 \rightarrow B^+ + B^-$, сопровождается формированием корреляционной энергетической щели в плотности состояний вырожденного двумерного дырочного газа.

Второй параграф посвящен исследованию электрических и оптических свойств полученных СККЯ *p*-типа проводимости на поверхности кремния (100) *n*-типа. Данные исследований ЦР, угловых зависимостей проводимости и холловские измерения демонстрируют, что наличие дипольных центров бора внутри δ -барьеров приводит к высоким значениям подвижности, благодаря чему стала возможной идентификация

энергетических позиций уровней квантования двумерных дырок в СККЯ при комнатной температуре. Для этой цели использовались измерения спектров электролюминесценции с помощью ИК-Фурье спектрометра IFS-115 Bruker Physik AG, а также – прямых ВАХ высокого разрешения. Кроме того, спектр ИК-электролюминесценции, возникающий вследствие оптических переходов между подзонами двумерных дырок, был модулирован в тера- и гигагерцевом диапазоне длин волн. Данная модуляция обусловлена сверхпроводящими свойствами δ -барьеров, которые проявляются, если плотность двумерных дырок превышает 10^{11} см⁻². Наличие микрорезонаторов, самоорганизующихся в рамках фрактальной самоорганизации микродефектов, позволило определить зонную структуру δ -барьеров с помощью измерений спектров отражения. Резкое уменьшение коэффициента отражения в условиях прямых переходов, по-видимому, обусловлено формированием широкозонного полупроводникового δ -барьера при увеличении концентрации бора, что приводит к энергетическому ограничению более 1.25 эВ в зоне проводимости и валентной зоне СККЯ.

В третьей главе представлены все возможные на сегодняшний день методики идентификации наличия сверхпроводящих свойств кремниевых сэндвич-наноструктур на поверхности Si (100) *n*-типа, которые представляют собой СККЯ *p*-типа с высокой подвижностью носителей тока, ограниченные δ -барьерами, сильнолегированными бором.

В первом параграфе обсуждаются результаты исследования температурной зависимости сопротивления в магнитном поле. Вольт-амперные характеристики, измеренные при разных температурах, демонстрируют омический характер, и температурная зависимость сопротивления соответствует поведению двумерного металла в интервале 220-300 К. Ниже 220 К сопротивление сначала возрастает до значения 6.453 кОм, а затем резко падает, достигая при $T=145$ К пренебрежимо малых значений. Показано, что в условиях внешнего магнитного поля резкий спад сопротивления наблюдался при более низких температурах, чем в его отсутствие. Причем эти изменения сопровождались уширением области перехода и сохранением величины добавочного пика сопротивления. Подобное поведение, характерное для неоднородной сверхпроводящей структуры, показывает, что Кондо-рассеяние, по-видимому, является предвестником оптимального туннелирования одиночных дырок через дипольные центры бора. Кроме того, два экспериментальных факта должны быть специально отмечены. Во-первых, максимальное значение сопротивления в добавочном пике, $6.453 \text{ кОм} \approx h/4e^2$, не зависит от значения внешнего магнитного поля. Во-вторых, неожиданным является, что внешнее магнитное поле стабилизирует δ -

барьер в состоянии двумерного металла вплоть до значений температур, соответствующих сверхпроводящему переходу. Таким образом, δ -барьеры, ограничивающие СККЯ, по-видимому, самоорганизуются подобно графену благодаря сильному легированию бором, которое приводит к формированию центров с отрицательной корреляционной энергией.

Во втором параграфе представлены результаты исследования температурных и полевых зависимостей диамагнитной восприимчивости сэндвич-наноструктуры. Диаграмма магнитной восприимчивости в координатах температура - магнитное поле позволяет определить значение второго критического поля $H_{C2}=0.22$ Т, которое практически идентично величине, полученной из измерений сопротивления в магнитном поле. Следует отметить, что оценка длины когерентности с помощью экспериментально измеренного значения H_{C2} , $\xi=39$ нм, где $\xi=(\Phi_0/2\pi H_{C2})^{1/2}$, $\Phi_0=h/2e$; находится в хорошем соответствии с величинами сверхпроводящей щели, 2Δ , и первого критического поля $H_{C1}=215$ Э. Значение критической температуры, $T_C=145$ К, а также – величина сверхпроводящей щели, $2\Delta=0.044$ эВ, и второго критического поля, $H_{C2}=0.22$ Т, определенные на основании данных измерений сопротивления и термо-эдс, согласуются с результатами исследований температурных и полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости. Эти зависимости измерялись в интервале температур $3.5\div 300$ К методом Фарадея. Осцилляции значений магнитной восприимчивости, наблюдаемые при изменении магнитного поля и температуры, по-видимому, обусловлены поведением многоквантовых вихрей, которые самоорганизуются внутри δ -барьеров. Центрами захвата этих вихрей, по всей видимости, являются микродефекты, состоящие из междоузельных атомов кремния, которые идентифицированы с помощью СТМ. При этом второе критическое поле, H_{C2} , очевидно ступенчатым образом зависит как от температуры, так и от внешнего магнитного поля, поскольку критический ток возрастает дискретно каждый раз, когда очередной вихрь захватывается на микродефект. В частности, ступенчатое возрастание критического тока проявляется в виде осцилляций диамагнитного отклика. Причем период этих осцилляций, соответствует расстоянию между микродефектами со средним размером 68 нм, идентифицированных с помощью СТМ: $\Delta B \cdot S = \Phi_0$, где ΔB – период осцилляций; $S = \pi d^2/4$; d – расстояние между микродефектами, $d \approx 120$ нм. Следует отметить, что температурная зависимость $H_{C2}(T)$ находится в хорошем согласии с величиной этого периода, поскольку каждый максимум диамагнитного отклика в В-Т диаграмме сопровождается возникновением температурного сателлита, сдвинутого приблизительно на 140 К в область высоких температур. Кроме того, В-Т диаграмма проявляет эффект квантования

критического тока, который, по-видимому, обусловлен последовательным захватом вихрей на микродефекты.

Третий параграф посвящен изучению позиции скачка теплоемкости от величины внешнего магнитного поля. В нулевом магнитном поле этот скачок теплоемкости наблюдается при температуре 152 К, что близко к значению T_C , определенному из измерений температурных и полевых зависимостей сопротивления и статической магнитной восприимчивости.

В четвертом параграфе продемонстрирована идентификация сверхпроводящей щели с помощью туннельных ВАХ. Полученные результаты показывают, что значения сверхпроводящей щели, определенные из измерений T_C при использовании различных методик, практически идентичны, 0.044 эВ. Тем не менее, для наиболее точной идентификации сверхпроводящей щели в кремниевой сэндвич-наноструктуре полезно применить прямые методы, основанные на принципах туннельной спектроскопии. Измеренная туннельная ВАХ прямо демонстрирует, что величина сверхпроводящей щели в отсутствие внешнего магнитного поля равна 0.044 эВ. Кроме того, для прямой регистрации наличия сверхпроводящей щели может быть использована методика локальной туннельной спектроскопии (ЛТС). С ее помощью локальная плотность состояний определяется при измерении туннельного тока в условиях развертки напряжения, приложенного к СТМ –игле, позиция которой поддерживается в фиксированном вертикальном положении. Регистрация спектров туннельной проводимости обеспечивает измерения локальной плотности состояний, таким образом, позволяя прецизионно определить величину сверхпроводящей щели. Во многом благодаря этому обстоятельству, ЛТС-ВАХ сэндвич-наноструктуры, также демонстрирует величину сверхпроводящей щели равную 0.044 эВ, что находится в хорошем согласии с данными измерений критической температуры и второго критического поля.

В пятом параграфе анализируются возможные механизмы возникновения сверхпроводимости сэндвич-наноструктур δ -барьер–СККЯ– δ -барьер. Чтобы идентифицировать перенос биполяронов малого радиуса как основной механизм сверхпроводящих свойств кремниевых сэндвич-наноструктур, необходимо было изучить влияние внешнего магнитного поля на процессы транспорта двумерных дырок в СККЯ. Полевые зависимости продольной ЭДС позволили исследовать зеэмановское расщепление состояний двумерных дырок и тем самым определить энергетические характеристики синглетной и возбужденной триплетной конфигураций дипольных центров бора, ответственных за спиновую поляризацию в СККЯ, ограниченной сверхпроводящими δ -барьерами. Экстремально малое значение эффективной массы двумерных дырок в кремниевых сэндвич-наноструктурах, которое было обнаружено при

исследовании осцилляций Шубникова-де Гааза, спектров циклотронного резонанса и осцилляций Ааронова-Кашера, по-видимому, является главным аргументом в пользу биполярного механизма высокотемпературной сверхпроводимости, основанного на когерентном туннелировании дырочных биполяронов. Этот вывод подтверждается наличием соответствующей локальной фононной моды, которая вместе со сверхпроводящей щелью проявляется в спектрах пропускания инфракрасного диапазона длин волн.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик сэндвич–наноструктур типа сверхпроводник–СККЯ–сверхпроводник. В роли двумерного сверхпроводника, ограничивающего СККЯ, выступает δ -барьер, сильнолегированный бором. Основное внимание в ходе проведения экспериментов уделялось изучению взаимосвязанности квантования проводимости и сверхтока соответственно при температурах выше и ниже критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

В первом параграфе кратко представлена исследуемая сэндвич–наноструктура типа сверхпроводник–СККЯ–сверхпроводник на основе сверхузкой кремниевой квантовой ямы p -типа проводимости, которая была получена на поверхности кремния (100) n -типа между δ -барьерами, сильнолегированными бором. Важно, что наличие p^+-n перехода, встроенного в сэндвич–наноструктуру, позволяет исследовать туннельные эффекты, в том числе андреевское отражение, в условиях как прямого и обратного напряжения смещения, так и в условиях тянущего напряжения смещения в рамках холловской геометрии структуры.

Второй параграф посвящен исследованию характеристик нормального состояния. Представлены экспериментальные ВАХ туннельного тока и проводимости дырок в сэндвич–наноструктуре в условиях прямого и обратного напряжения, приложенного при $T > T_c$ к вертикальному затвору в СККЯ.

В третьем параграфе помимо анализа экспериментальных результатов исследования джозефсоновского сверхтока в переходе сверхпроводник–СККЯ–сверхпроводник представлен анализ корреляций осцилляций сверхтока и проводимости соответственно ниже и выше T_c .

В четвертом параграфе приведены результаты исследования многократного андреевского отражения между сверхпроводящими слоями экспериментальной сэндвич–наноструктуры. Пики многократного андреевского отражения были обнаружены на ВАХ туннельного тока в сэндвич–наноструктуре в условиях прямого и обратного напряжения, приложенного к вертикальному затвору в СККЯ при $T < T_c$. Кроме того, важно подчеркнуть, что пики многократного андреевского отражения были

зарегистрированы при исследовании ВАХ продольной проводимости высокого разрешения, которая также демонстрирует сверхпроводящую энергетическую щель, величина которой 44 мэВ. Таким образом, процессы многократного андреевского отражения двумерных дырок в СККЯ, обеспечивают микроскопический механизм, ответственный за сверхпроводящий эффект близости в сверхпроводящих кремниевых сэндвич–наноструктурах. Сама возможность многократного андреевского отражения возникает благодаря тригональной ориентации дипольных центров бора в δ -барьерах. Полученные результаты показывают, что андреевское отражение является спинозависимым процессом, его протекание может способствовать спиновой ориентации носителей в сэндвиче.

Пятый параграф посвящен изучению взаимосвязанности между I_C и плато проводимости нормального состояния. Важно отметить, что в процессах туннелирования при $T < T_C$ квантуется сверхток, пик которого наблюдается при прохождении уровней размерного квантования дырок через энергетическую щель. В свою очередь, при $T > T_C$ наблюдается традиционное квантование проводимости. Причем, позиции пиков проводимости совпадают с позициями максимумов сверхтока, тем самым, демонстрируя сильную корреляцию в туннелировании одиночных дырок и куперовских пар. Таким образом, еще раз получило экспериментальное подтверждение соотношение Беннакера, $I_C = \pi A / e \cdot G_N$, между величиной сверхтока в сверхпроводящем состоянии и величиной проводимости в нормальном состоянии системы. Интересно, что произведение сверхтока и сопротивления квантовой ямы в нормальном состоянии ведет себя в противофазе с осцилляциями сверхтока и проводимости, соответственно ниже и выше T_C .

В шестом параграфе рассмотрены экспериментальные результаты наблюдения дробных амплитуд андреевских пиков, которые выявляются при регистрации всех трех версий многократного андреевского отражения в исследуемых сэндвич–структурах. Этот результат свидетельствует о совокупном вкладе нескольких одномерных каналов в амплитуду каждого андреевского пика, что, по-видимому, хорошо описывается известным соотношением: $G = G_0 + G_1 + \dots + G_n$; где G берется из амплитуды андреевских пиков, $I = (\pi A / e) G$, и проводимость суммируется по всем одномерным каналам с целыми и дробными андреевскими процессами, которые вызваны парами дырок, $G_n = 2e^2 / h$, а так же их частями, $G_n = 2ee^* / h$, где $e^* = fe$, f – дробное значение.

В пятой главе рассматриваются возможности создания спинового транзистора на основе СККЯ, ограниченной сверхпроводящими δ -

барьерами, концептуально основанного на двух спиновых поляризациях электронных волн.

Первый параграф посвящен теоретическому подходу к решению данной задачи. Модуляция тока в предлагаемой полупроводниковой структуре возникает из-за спиновой прецессии, обусловленной спин-орбитальным взаимодействием в зоне проводимости или валентной зоне, в то время как магнитные контакты используются предпочтительно для инъекции и детектирования определенных спиновых ориентаций. Предполагается, что доминирующим механизмом спинового расщепления в нулевом магнитном поле является терм Рашбы, учтенный в гамильтониане эффективной массы.

Во втором параграфе представлены экспериментальные результаты исследования характеристик спинового транзистора в условиях продольного транспорта двумерных дырок. Экспериментальная структура спинового транзистора была изготовлена в рамках холловской геометрии на основе СККЯ p -типа проводимости, полученной на поверхности Si (100) n -типа. При этом поведение продольной, G_{xx} , и поперечной, G_{xy} , компонент проводимости исследовалось в условиях изменения напряжения на вертикальном затворе, которое управляет не только величиной спин-орбитального взаимодействия Рашбы, но и плотностью двумерных дырок в СККЯ. Поэтому были проведены соответствующие измерения холловских зависимостей для определения относительного вклада в продольную и поперечную проводимость возможного изменения плотности дырок в СККЯ при варьировании величиной напряжения на вертикальном затворе. Показано, что осцилляции дырочной проводимости, обусловленные изменениями величины спин-орбитального взаимодействия, наблюдаются при крайне малых значениях напряжения на вертикальном затворе, поскольку как увеличение, так и уменьшение плотности двумерных дырок способствуют тушению проводимости и/или приводят к ее осцилляциям вследствие изменений фермиевского волнового вектора. Кроме того, эффект спинового транзистора и спиновый эффект Холла обнаружены при больших значениях напряжения вертикального затвора, поскольку в этом случае, по данным холловских измерений, также не возникает изменений в плотности и подвижности двумерных дырок. Важно отметить, что впервые были зарегистрированы осцилляции Шубникова–де Газа при параллельной ориентации магнитного поля относительно плоскости квантовой ямы. Этот результат является дополнительным доказательством формирования сверхпроводящих свойств δ -барьеров, поскольку знак регистрируемой эдс соответствует противоположному направлению вносимого параллельно плоскости СККЯ магнитного поля, что идентифицирует диамагнитный отклик структуры.

Версия спинового транзистора, предложенная в настоящей работе, основана на спиновзависимых процессах многократного андреевского отражения, которые ответственны за возникновение спиновой поляризации носителей тока в квантовых структурах, ограниченных сверхпроводящими барьерами. Причем спин дырки и электрона, отраженного от δ -барьера, ориентируются строго вдоль избранного кристаллографического направления [111], которое определяется тригональной симметрией дипольного центра бора. Поэтому механизм спиновзависимого транспорта дырок в плоскости СККЯ, обнаруженного с помощью зависимости продольной проводимости от напряжения вертикального затвора, по-видимому, основан на влиянии спин-орбитального взаимодействия Рашбы в валентной зоне СККЯ на спиновую прецессию дырок, поляризованных вследствие процессов многократного андреевского отражения. В энергетическом интервале сверхпроводящей щели влияние спин-орбитального взаимодействия Рашбы ограничивается амплитудной модуляцией андреевских пиков проводимости, тогда как вне ее спиновая поляризация носителей тока приводит к осцилляциям проводимости в рамках классического эффекта спинового транзистора. Зависимость G_{xx} от величины напряжения вертикального затвора демонстрирует воспроизводимые осцилляции с амплитудой $\sim e^2/h$, что указывает на важную роль спиновой интерференции в продольном транспорте дырок. Данные осцилляции проводимости, индуцированные спин-орбитальным взаимодействием Рашбы, сглаживают амплитуду пиков многократного андреевского отражения, практически выравнивая их вблизи значения $\sim e^2/h$. Кроме того, при малых значениях напряжения вертикального затвора наблюдается уменьшение проводимости на величину $\sim 2e^2/h$ при $U_g > 0$, и ее увеличение на такую же величину при $U_g < 0$. Причем большая положительная величина G_{xx} , обнаруженная при нулевом напряжении вертикального затвора, обусловлена отсутствием симметрии в поведении характеристик вертикального транспорта носителей тока, вследствие чего тянущего тока $I_{ds} = 10$ нА при наличии $p^+ - n$ перехода оказалось достаточно, чтобы индуцировать спиновую составляющую продольной проводимости при $U_g = 0$. Т.е., даже при нулевом смещении продольная проводимость отлична от нуля, и ее знак соответствует $U_g < 0$.

Таким образом, вследствие асимметрии вертикального транспорта, на каждой стороне сэндвич-структуры формируются два краевых канала, в которых дырки двигаются в противоположных направлениях. Кроме того, они имеют разную плотность и, в силу спиновой зависимости андреевского отражения, антипараллельную ориентацию спинов. В этом случае, если принять во внимание условие конструктивной квантовой интерференции, в рамках которого носители тока на противоположных краях сэндвич-структуры также двигаются в противоположных направлениях и имеют

антипараллельную ориентацию спинов, тогда при обратном и прямом смещении формируются разные петли продольной проводимости. Таким образом, возникают условия для наблюдения квантового спинового эффекта Холла [13]. Причем знак поперечной проводимости, G_{xy} , обнаруженной при нулевом напряжении смещения соответствует знаку продольной проводимости, G_{xx} . В свою очередь, спин-орбитальное взаимодействие Рашбы, величина которого изменяется с помощью напряжения вертикального затвора, также сглаживает амплитуду пиков многократного андреевского отражения в зависимости G_{xy} от напряжения вертикального затвора, как и в аналогичной зависимости G_{xx} . Необходимо отметить, что наблюдаемые в позициях пиков многократного андреевского отражения осцилляции поперечной проводимости, G_{xy} , с амплитудой $\sim e^2/h$, находятся в противофазе с аналогичными пиками в осцилляциях G_{xx} в энергетическом интервале сверхпроводящей щели.

Важным критерием, во многом объясняющим обнаружение спинозависимого транспорта при высоких температурах, является низкое значение эффективной массы тяжелой дырки, $4 \cdot 10^{-4} m_0$, определенное из величины периода осцилляций проводимости Ааронова-Кашера в зависимости от напряжения вертикального затвора вне интервала сверхпроводящей щели. Данный эффект обычно сопровождает эффект Ааронова-Бома, который отличается тем, что осцилляции проводимости регистрируются при изменении не напряжения вертикального затвора, а величины внешнего магнитного поля, приложенного перпендикулярно плоскости квантовой ямы. Поэтому регистрация эффекта Ааронова-Бома в структуре спинового транзистора является одним из главных критериев баллистического режима транспорта носителей тока. Следует отметить, что период осцилляций Ааронова-Бома, обнаруженных при исследовании структуры спинового транзистора, $\Phi_0 = ABS$, находится в четком соответствии с геометрией используемых контактов, где AB – период осцилляций Ааронова-Бома, S – площадь контакта.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сверхузкие кремниевые квантовые ямы (СККЯ) p -типа проводимости, ограниченные δ -барьерами, сильнолегированными бором, были получены на поверхности кремния (100) n -типа. Наличие вертикального затвора позволило изменять величину спин-орбитального взаимодействия Рашбы в процессе транспорта дырок в краевых каналах СККЯ, полученной в рамках холловской геометрии.

Позиции энергетических подзон размерного квантования легких и тяжелых дырок в СККЯ были идентифицированы с помощью исследований спектров электролюминесценции и туннельных ВАХ. Исследования угловых зависимостей спектров циклотронного резонанса, сканирующей туннельной микроскопии и электронного парамагнитного резонанса показали, что наноструктурированные δ -барьеры содержат тригональные дипольные центры бора, B^+B^- , с отрицательной корреляционной энергией, которые сформированы вследствие реконструкции мелких акцепторов, $2B^0 \rightarrow B^+ + B^-$. Спектральные зависимости коэффициента отражения позволили определить зонную структуру δ -барьеров с энергетическим ограничением более 1.25 эВ в зоне проводимости и валентной зоне СККЯ.

2. Температурные и полевые зависимости удельного сопротивления, термо-эдс, теплоемкости и магнитной восприимчивости свидетельствуют о наличии высокотемпературной сверхпроводимости в СККЯ p -типа проводимости, ограниченных δ -барьерами, сильнолегированными бором, если плотность двумерных дырок превышает критическое значение 10^{11} см^{-2} . Использование методик регистрации теплоемкости и статической магнитной восприимчивости позволило обнаружить осцилляции второго критического поля и критической температуры в зависимости от величины внешнего магнитного поля и температуры, которые возникают вследствие квантования сверхтока. Величина сверхпроводящей щели, 0.044 эВ, полученная в результате измерений критической температуры при использовании различных методик, согласуется с данными регистрации туннельных ВАХ, спектров локальной туннельной спектроскопии, а также - соответствует энергии локальной фононной моды, которая вместе со сверхпроводящей щелью проявляется в спектрах пропускания инфракрасного диапазона длин волн.
3. Исследование туннельных ВАХ СККЯ p -типа проводимости, ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами на поверхности Si (100) n -типа, позволило обнаружить:
 - квантование сверхтока, которое определяется позициями уровней размерного квантования дырок в СККЯ;
 - осцилляции ВАХ сверхтока при $T < T_C$ ($T_C = 145 \text{ K}$), которые практически идентичны осцилляциям ВАХ проводимости при $T > T_C$, что отражает наличие корреляции в туннелировании соответственно куперовских пар и одиночных дырок;
 - процессы многократного андреевского отражения двумерных дырок в СККЯ, которые обеспечивают микроскопический механизм,

ответственный за сверхпроводящий эффект близости в сверхпроводящих кремниевых наноструктурах;

- ВАХ проводимости двумерных дырок в плоскости СККЯ, которая идентифицирует наличие когерентного туннелирования в условиях спинозависимого многократного андреевского отражения между ограничивающими ее сверхпроводящими δ -барьерами.

4. Изучение зависимостей продольной и поперечной проводимости в плоскости СККЯ от величины напряжения вертикального затвора позволило обнаружить ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла внутри энергетического интервала сверхпроводящей щели. Полученные результаты объясняются в рамках влияния спин-орбитального взаимодействия Рашбы на спиновую прецессию дырок, поляризованных вследствие процессов многократного андреевского отражения в краевых каналах.

Было обнаружено, что в энергетическом интервале сверхпроводящей щели влияние спин-орбитального взаимодействия Рашбы ограничивается амплитудной модуляцией андреевских пиков дырочной проводимости, тогда как вне ее спиновая поляризация дырок в краевых каналах СККЯ приводит к осцилляциям проводимости в рамках классического эффекта спинового транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ipatova I.P., Shchukin V.A., Malyshkin V.G., Maslov A.Yu. Anastassakis E., Formation of strained superlattices with a macroscopic period via spinodal decomposition of III-V semiconductor alloys, *Sol.St.Comm.*, v.**78**, p.19 (1991).
2. Nötzel R., Self-organized growth of quantum-dot structures, *Semiconductor Sci.&Technol.*, v.**11**, p.1365 (1996).
3. Bagraev N.T., Gehlhoff W., Klyachkin L.E., Naeser A., Rykov S.A., Quantum-Well Boron and Phosphorus Diffusion Profiles in Silicon, *Def. Dif. Forum*, v.**143**, p.1003 (1997).
4. Gossmann H.J., Poate J.M., Dopant and intrinsic point-defect interaction in Si, *Proc. of the 23rd International conf. on Physics of semiconductors (Berlin, Germany)*, ed. by M. Scheffler and R. Zimmermann, *World Scientific, Singapore*, v.**4**, p.2569 (1996).
5. Thornton T.J., Mesoscopic devices, *Rep. Prog. Phys.*, v.**58**, p.311 (1994).
6. Klapwijk T.M., Proximity effect from an Andreev perspective, *Journal of Superconductivity Incorporating Novel Magnetism*, v.**17**, p.593 (2004).
7. Jarillo-Herrero P., van Dam J.A., Kouwenhoven L.P., Quantum supercurrent transistors in carbon nanotubes, *Nature*, v.**439**, p.953 (2006).

8. Jie Xiang, Vidan A., Tinkham M., Westervelt R.M., Lieber Ch., Ge-Si nanowire mesoscopic Josephson Junctions, *Nature-nanotechnology*, v.1, p.208 (2006).
9. Tinkham M., Introduction to Superconductivity, *Dover New York*, (1996).
10. Beenakker C.W.J., van Houten H., Josephson current through a superconducting quantum point contact shorter than the coherence length, *Phys. Rev. Lett.*, v.66, p.3056 (1991).
11. Blonder G.E., Tinkham M., Klapwijk, T.M., Transition from metallic to tunneling regimes in superconducting micro-constrictions — excess current, charge imbalance, and super-current conversion, *Phys. Rev. B*, v.25, p.4515 (1982).
12. Andreev A.F., The thermal conductivity of the intermediate state in superconductors, *Sov. Phys. JETP*, v.19, p.1228 (1964).
13. König M., Wiedmann S., Brune C., Roth A., Buhmann H., Molenkamp L.W., Xiao-Liang Q., Shou-Cheng Z., Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells, *Science*, v.318, p.766 (2007).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Bagraev N.T., Gehlhoff W., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., Oganessian G.A., Poloskin D.S., Romanov V.V., Spin-dependent transport of holes in silicon quantum wells confined by superconductor barriers, *Physica C*, v.468, p.p.840-843 (2008).
2. Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., Prokhorov L.V., On fractioning of quanta: electrons and neutrons, *JINR*, v.1, p.p.3-9 (2008).
3. Баграев Н.Т., Клячкин Л.Е., Кудрявцев А.А., Маляренко А.М., Романов В.В., Сверхпроводящие свойства кремниевых наноструктур, *ФТП*, т.43, вып.11, стр.1481-1495 (2009).
4. Баграев Н.Т., Клячкин Л.Е., Кудрявцев А.А., Маляренко А.М., Оганесян Г.А., Полоскин Д.С., Квантование сверхтока и андреевское отражение в кремниевых наноструктурах, *ФТП*, т.43, вып.11, стр.1496-1506 (2009).
5. Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., *Magnetic resonance spectroscopy of single centers in silicon quantum wells*, *Physica B*, v.404, p.5140 (2009).
6. Bagraev N.T., Gets D.S., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., Mashkov V.A., Romanov V.V., *ODMR and EDEPR of impurity centres embedded in silicon microcavities*, *Physica B*, v.404, p.5144 (2009).
7. Bagraev N.T., Gehlhoff W., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., Romanov V.V., Spin-dependent transport of holes in silicon quantum wells confined by superconductor barriers, *AIP*, v.1199, p.p.431-432 (2010).