

На правах рукописи

ДАНИЛОВСКИЙ ЭДУАРД ЮРЬЕВИЧ

**КВАНТОВАННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ
НАНОСТРУКТУР, СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ**

специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук
Баграев Николай Таймуразович
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Баранов Павел Георгиевич
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Доктор физико-математических наук, профессор
Гасумянц Виталий Эдуардович
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Санкт-
Петербургский государственный университет»

Защита состоится «16» февраля 2012 г. в 15.00 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 «11» января 2012 г.

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



Петров А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Данная работа посвящена исследованию квантованной проводимости дырок в краевых каналах кремниевых наносандвичей, которые представляют собой сверхузкие кремниевые квантовые ямы p -типа, ограниченные сильно легированными бором δ -барьерами, на поверхности Si (100) n -типа.

Основное направление исследований относится к интенсивно развивающейся в последнее время физике нового класса материалов - топологических изоляторов и сверхпроводников, которые характеризуются наличием поверхностных или краевых состояний, возникающих вследствие исчезновения запрещенной зоны в энергетическом спектре [1,2]. В частности, топологические краевые каналы являются аналогами баллистических проводящих каналов, ответственных за наблюдение квантового эффекта Холла в условиях пересечения уровней Ландау и уровня Ферми вблизи границ полупроводниковых квантовых ям. Кроме того, в топологических изоляторах и сверхпроводниках проявляются новые версии спинозависимого транспорта, которые не наблюдались ранее ни в одной из известных 1D или 2D систем, а именно, формируются пары краевых одномерных каналов, в которых носители имеют противоположную ориентацию спинов в отсутствие внешнего магнитного поля [1,3].

Важным преимуществом планарных кремниевых наносандвичей, по сравнению с топологическими изоляторами на основе гетеропереходов HgTe/CdTe [4,5] или графена [6], является наличие сверхмелкого $p+n$ перехода в планарной структуре, выполненной в рамках холловской геометрии. В этом случае вертикальный транспорт носителей блокируется, что способствует идентификации явлений спинозависимого транспорта носителей, таких как эффект спинового транзистора [7] и квантовый спиновый эффект Холла [8]. При этом необходимым условием для их наблюдения становится стабилизация тянущего тока исток-сток на крайне низком значении. Кроме того, в наносандвичах p -типа проводимости, полученных на поверхности полупроводников n -типа, создаются условия для возникновения спиновой поляризации носителей в условиях многократного Андреевского отражения между δ -барьерами, которое может контролироваться путем варьирования величиной спин-орбитального взаимодействия Бычкова-Рашбы [9,10]. Причем влияние спиновой поляризации носителей на мезоскопический транспорт в краевых каналах практически не исследовалось.

Представляется, что наиболее эффективным устройством для анализа спинозависимых свойств топологических краевых каналов

является спиновый транзистор с вертикальным затвором. В первой версии спинового транзистора предполагалось, что квантовая интерференция в условиях спиновой прецессии поляризованных носителей тока, обусловленной варьированием величиной спин-орбитального взаимодействия (СОВ) в полупроводниковой квантовой яме, приводит к модуляции проводимости [7]. При этом в качестве контактов, играющих роль истока и стока при инжекции и детектировании определенных спиновых состояний носителей, предлагалось использовать ферромагнетики, например железо, являющиеся также поляризатором и анализатором [7,11,12]. Тем не менее, как инжекция, так и оптическая накачка циркулярно поляризованным светом [13] приводит к возникновению неравновесного состояния поляризованных по спину носителей. Это позволяет эффективно использовать терминологию гальваномагнитных и фотогальванических спиновых явлений при использовании геометрии холловского мостика [14], однако затрудняет рассмотрение спинозависимого транспорта в рамках приближений, используемых для описания равновесных процессов, например, таких как эффект Холла, основным условием наблюдения которого является жесткая стабилизация тока исток-сток [15,16].

Поэтому представляет большой интерес экспериментальная реализация равновесной низкоразмерной системы носителей тока с неравновесной спиновой поляризацией, иными словами, с отличием спиновой температуры от температуры решетки. Краевые топологические каналы являются одной из версий таких низкоразмерных систем, особенно в случае их получения в структуре наносандвичей. В качестве механизмов изменения спиновой температуры могут, например, рассматриваться спонтанная спиновая поляризация и многократное Андреевское отражение, которые достаточно хорошо исследованы в различных наносандвичах [10, 17]. Таким образом, наличие краевых топологических состояний позволяет использовать наносандвичи для наблюдения эффектов спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла в рамках холловской геометрии без выполнения контактами исток-сток функции поляризатора и анализатора.

Вышесказанное определяет актуальность темы данной диссертационной работы.

Цель работы заключалась в обнаружении и исследовании квантованной проводимости в кремниевых наносандвичах, которая позволяет идентифицировать наличие краевых топологических каналов и демонстрирует возможность их использования для регистрации эффектов спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла.

В задачи работы входило изучение следующих вопросов:

1. Исследование туннельных ВАХ в условиях прямого и обратного напряжения для определения энергетических позиций уровней двумерных дырок в кремниевых наносандвичах, которые представляют собой сверхузкую кремниевую квантовую яму p -типа, ограниченную сильно легированными бором δ -барьерами.
2. Измерение продольного и поперечного (холловского) падений напряжения в холловской геометрии эксперимента при условии стабилизации тянущего тока исток-сток на малых значениях (<1 нА) для идентификации наличия краевых каналов проводимости в кремниевых наносандвичах.
3. Регистрация эффекта спинового транзистора в кремниевом наносандвиче посредством измерения продольного падения напряжения в холловской геометрии эксперимента при варьировании величиной напряжения вертикального затвора в условиях стабилизации тянущего тока исток-сток.
4. Обнаружение и исследование квантового спинового эффекта Холла путем регистрации холловской проводимости в зависимости от напряжения вертикального затвора, эффективно управляющего величиной спин-орбитального взаимодействия Бычкова-Рашбы и процессами многократного Андреевского отражения в кремниевых наносандвичах.
5. Измерение продольных вольт-амперных характеристик кремниевых наносандвичей со встроенными микроволновыми резонаторами для детектирования участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ступеней Фиске вследствие генерации гигагерцевого и терагерцевого излучения δ -барьерами ниже критической температуры их перехода в сверхпроводящее состояние.
6. Идентификация генерации электромагнитного излучения в гигагерцевом и терагерцевом диапазонах посредством регистрации ступеней Шапиро на туннельной ВАХ кремниевое наносандвича со встроенными микрорезонаторами при использовании в качестве источника излучения идентичной структуры.

Научная новизна работы.

1. Измерения продольного и холловского падения напряжения в зависимости от напряжения на вертикальном затворе в отсутствие внешнего магнитного поля показали, что в кремниевых наносандвичах формируется система краевых каналов, о чем свидетельствует обнаруженное дискретное изменение продольной проводимости, $Z \cdot 2e^2/h$, при увеличении стабилизированного продольного тока исток-сток, где Z принимает значения 2 и 0.7.

2. При низких значениях стабилизированного тока исток-сток, $I_{ds} = 0.25$ нА, величина продольной проводимости, $G_{xx} = 4e^2/h$, $Z = 2$, отражает вклад процессов многократного Андреевского отражения в транспортные характеристики краевых каналов в кремниевых наносандвичах.
3. При увеличении стабилизированного тока исток-сток, $I_{ds} = 0.5$ нА, в отсутствие электростатического ограничения впервые обнаружена «0.7-особенность» при регистрации продольной проводимости, $G_{xx} = 0.7 \cdot (2e^2/h)$, $Z = 0.7$, что свидетельствует о спиновой поляризации дырок в краевых каналах кремниевых наносандвичей. В отсутствие электростатического ограничения и внешнего магнитного поля «0.7-особенность» наблюдается впервые.
4. При низких значениях стабилизированного тока исток-сток, $I_{ds} = 0.25$ нА, кроме продольной проводимости, $G_{xx} = 4e^2/h$, обнаружена холловская проводимость, величина которой, $G_{xy} = e^2/h$, свидетельствует о регистрации квантового спинового эффекта Холла в кремниевых наносандвичах. Наблюдаемое при этом соотношение между холловской и продольной проводимостями составляет $G_{xy}/G_{xx} = 0.25$, что согласуется с результатами оценок, полученных в рамках формализма Ландауэра-Буттикера для системы парных одномерных топологических каналов, в которых носители имеют противоположную ориентацию спинов.
5. Измерения продольных вольт-амперных характеристик кремниевых наносандвичей в условиях стабилизации тока исток-сток в интервале $I_{ds} = 5 \div 20$ нА показали наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, обусловленного генерацией электромагнитного излучения вследствие нестационарного эффекта Джозефсона. Зарегистрированы ступени Фиске, вызванные резонансным взаимодействием между переменным джозефсоновским током и стоячими электромагнитными волнами в микрорезонаторе, встроенном в плоскость кремниевого наносандвича.
6. Генерация электромагнитного излучения гигагерцевого и терагерцевого диапазонов идентифицирована посредством регистрации ступеней Шапиро на прямой ветви вольт-амперной характеристики кремниевых наносандвичей при использовании в качестве источника излучения идентичной наноструктуры в условиях пропускания через нее стабилизированного тока исток-сток.

Достоверность полученных результатов 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 квантоворазмерных структурах на базе топологических изоляторов.

Научная и практическая значимость диссертационного исследования определяется результатами обнаружения и тщательного изучения квантованной проводимости в кремниевых наносандвичах, которая позволяет идентифицировать наличие краевых топологических каналов и демонстрирует возможность их использования для регистрации эффектов спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла. Следует отметить, что помимо фундаментального интереса, исследования краевых каналов в топологических изоляторах могут найти широкое практическое применение в различных областях нанoeлектроники: от спинтроники до разработки квантовых компьютеров.

С практической точки зрения представляет интерес идентификация генерации электромагнитного излучения кремниевыми наносандwichами как посредством детектирования участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ступеней Фиске на продольной ВАХ, так и путем регистрации ступеней Шапиро на прямой ветви вольт-амперной характеристики кремниевых наносандwichей. Исследования в этом направлении открывают возможности для создания принципиально новых портативных приемников и источников гигагерцевого и терагерцевого излучения.

Защищаемые положения:

1. Туннельная вольт-амперная характеристика проводимости, демонстрирующая энергетические позиции подзон двумерных дырок в сверхузкой кремниевой квантовой яме p -типа, ограниченной сильно легированными бором δ -барьерами, на поверхности Si (100) n -типа, характеризуется наличием мезоскопических флуктуаций.
2. «0.7-особенность», $G_{xx} = 0.7 \cdot (2e^2/h)$, проявляется в продольной проводимости краевых каналов кремниевого наносандwichа в отсутствие электростатического ограничения и внешнего магнитного поля.
3. Значение продольной проводимости $G_{xx} = 4e^2/h$ и «0.7-особенность», $G_{xx} = 0.7 \cdot (2e^2/h)$, обнаруженные при малых значениях стабилизированного тока исток-сток (<1 нА), свидетельствуют о наличии спиновой поляризации носителей в краевых каналах кремниевого наносандwichа.
4. Обнаружение холловской проводимости, $G_{xy} = e^2/h$, в условиях продольной проводимости $G_{xx} = 4e^2/h$ свидетельствуют о регистрации квантового спинового эффекта Холла, обусловленного спиновой поляризацией носителей в краевых каналах кремниевого наносандwichа.

5. Джозефсоновская вольт-амперная характеристика, обнаруженная в кремниевых наносандвичах со встроенными микрорезонаторами, демонстрирует участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ступени Фиске.
6. Регистрация ступеней Шапино, характеристики которых согласуется с данными измерений ступеней Фиске и участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, идентифицирует наличие генерации электромагнитного излучения в гигагерцевом и терагерцевом частотном диапазонах в кремниевых наносандвичах со встроенными микрорезонаторами.

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X International Conference on Nanostructured Materials (NANO2010), September 13 - 17 2010, Italy, Roma; X Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники-2011», 19 - 23 сентября 2011, Нижний Новгород; VII Международная конференция и VII Школа ученых и молодых специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе («КРЕМНИЙ 2011»), 05-08 июля 2011, НИТУ «МИСиС», Россия, Москва; 11th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN11), April 4 – 8, 2011, Germany, Berlin.

Публикации: по результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 5 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 топологических изоляторах и сверхпроводниках, которые помимо запрещенной зоны в объеме проявляют краевые проводящие состояния. Эти состояния возникают вследствие различных комбинаций спин-орбитального взаимодействия и симметрии по отношению к обращению времени [1-5].

В первом параграфе приводится теоретическое обоснование для формирования топологических изоляторов, в частности, на основе графена. Кроме того, представлены экспериментальные результаты, которые демонстрируют фундаментальные свойства этого нового класса

материалов. Далее рассматриваются результаты, полученные при исследовании транспортных характеристик носителей в квантовых ямах на основе HgTe/CdTe, которые демонстрируют наличие краевых состояний, предсказанных для двумерного топологического изолятора в режиме квантового спинового эффекта Холла. Особое внимание уделяется сравнительному анализу этих краевых состояний и краевых каналов, возникающих в рамках целочисленного квантового эффекта Холла в условиях сильного внешнего магнитного поля [4,5].

Во втором параграфе коротко обсуждаются основные экспериментальные результаты, полученные при исследовании структур на основе $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , и Sb_2Te_3 , которые проявляют свойства трехмерных топологических изоляторов. Рассматриваются особенности топологии их поверхностных состояний, в частности, наличие индуцированной энергетической щели, которая приводит к возникновению нового топологического магнетоэлектрического эффекта.

Третий параграф посвящен обзору работ по топологическим сверхпроводникам, характеризующихся наличием сверхпроводящей корреляционной энергетической щели в объеме материала и безщелевых краевых состояний, которые могут быть описаны с использованием идеи фермиона Майорана [2]. Подчеркивается, что, несмотря на значительные успехи в теоретических исследованиях свойств топологических сверхпроводников, однозначного экспериментального подтверждения существования майорановского фермиона на данный момент нет. Вместе с тем, активно ведутся работы, направленные на получение классических неравновесных явлений сверхпроводимости, таких как процессы многократного Андреевского отражения и эффекты Джозефсона, в наносандвичах типа сверхпроводник – топологический изолятор – сверхпроводник. Делается вывод, что наличие краевых топологических каналов проводимости может приводить к появлению новых спинозависимых явлений в наносандвичах в случае наличия в нем квантового точечного контакта или джозефсоновского перехода. Отдельный интерес в этом случае представляют планарные наносандвичи, выполненные в рамках холловской геометрии контактов с вертикальным затвором, благодаря возможности использования методики холловских измерений в исследованиях транспортных свойств краевых каналов.

В конце главы формулируются цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены литературные данные исследований квантовой лестницы электронной и дырочной проводимости одномерных каналов, полученных с помощью методики расщепленного затвора внутри

самоупорядоченных кремниевых квантовых ям на поверхности Si (100) n -типа.

Первый параграф посвящен описанию баллистической проводимости одиночной квантовой проволоки. Приводится выражение Ландауэра-Буттикера для кондактанса идеальной квантовой проволоки $G = G_0 T$, где T - коэффициент прохождения, $G_0 = g_s g_v (e^2/h) N$, g_s и g_v - спиновый и долинный факторы, соответственно; N - число заполненных одномерных подзон, которое изменяется в зависимости от напряжения на затворе, вследствие чего кондактанс изменяется скачком на величину $g_s g_v (e^2/h)$ каждый раз, когда уровень Ферми совпадает с одной из одномерных подзон. Обсуждаются экспериментальные данные исследований квантованной проводимости в одномерных каналах, полученных с помощью методики расщепленного затвора в гетеропереходах AlGaAs/GaAs.

Во втором и третьем параграфах рассматриваются ВАХ квантовой лестницы проводимости одномерных каналов, полученных с помощью методики расщепленного затвора внутри самоупорядоченных кремниевых квантовых ям n - и p -типа, соответственно, на поверхности Si (100), в зависимости от кинетической энергии электронов и дырок, их концентрации в квантовых ямах, а также — кристаллографической ориентации квантовых проволок. Показано, что величина квантовых ступенек электронной проводимости кристаллографически ориентированных проволок n -типа определяется анизотропией зоны проводимости кремния и полностью согласуется со значением долинного фактора для осей [001] ($G_0 = 4e^2/h$, $g_v = 2$) и [011] ($G_0 = 8e^2/h$, $g_v = 4$) в плоскости Si (100). В свою очередь квантовая лестница дырочной проводимости кремниевых проволок p -типа обусловлена независимыми вкладами одномерных подзон тяжелых и легких дырок, которые проявляются при исследовании проволок квадратного сечения в удвоении квантовых ступенек ($G_0 = 4e^2/h$), кроме первой ($G_0 = 2e^2/h$), вследствие отсутствия вырождения нижней одномерной подзоны. Анализ величины первой и второй квантовых ступенек, а также «0.7-особенности» квантовой лестницы проводимости, свидетельствует о спонтанной спиновой поляризации тяжелых и легких дырок, что подчеркивает важнейшую роль обменного взаимодействия в процессах одномерного транспорта одиночных носителей.

В четвертом параграфе кратко обсуждаются исследования интерференции баллистических носителей тока в одномерных кольцах, сформированных из квантовых проволок внутри самоупорядоченных кремниевых квантовых ям. В частности, демонстрируется возможность создания интерферометра Ааронова-Бома на основе одномерного кремниевого кольца в режиме слабой локализации, характеристики

которого показаны на примере изучения фазовой когерентности туннелирования одиночных носителей тока через квантовый точечный контакт.

В конце главы на основании представленных данных делается вывод о принципиальной аналогии между транспортными свойствами топологических краевых каналов в режиме квантового спинового эффекта Холла и квантовых одномерных проволок.

В третьей главе приведены результаты исследований электрических, оптических и магнитных свойств кремниевых наносандвичей, которые представляют собой сверхузкие кремниевые квантовые ямы (СККЯ) p -типа на поверхности Si (100) n -типа, огранные сильно легированными бором δ -барьерами.

В первом параграфе рассматриваются возможности получения сверхузких квантовых ям p -типа в условиях формирования слоя окисла на поверхности монокристаллического кремния (100) n -типа проводимости, сопровождающегося появлением избыточных потоков собственных межузельных атомов и вакансий, которые имеют выделенные кристаллографические направления соответственно вдоль осей $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$. При этом на основании данных сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) показано, что наличие тонкого, 220 нм, слоя окисла приводит к самоорганизации собственных межузельных атомов в микродефекты в форме пирамид с основанием 2×2 нм, самоупорядочивающиеся в δ -слои, параллельные поверхности кремния (100), между которыми формируются СККЯ. Пассивация оборванных связей в δ -слоях посредством кратковременной диффузии бора в окна в окисле кремния, полученные с помощью фотолитографии, приводит к трансформации δ -слоев микродефектов в δ -барьеры, сильно легированные бором, $N(B) = 5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Данные исследований циклотронного резонанса (ЦР), сканирующей туннельной микроскопии и ЭПР идентифицируют наличие в наноструктурированных δ -барьерах одиночных тригональных дипольных центров бора, $B^+ + B^-$, с отрицательной корреляционной энергией, которые сформированы вследствие реконструкции мелких акцепторов бора, $2B^0 \rightarrow B^+ + B^-$. Анализ полученных сверхмелких профилей концентрации бора, проведенный методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) позволил определить не только значение концентрации бора, но и глубину диффузионного профиля, которая не превышала 8 нм.

Второй параграф посвящен исследованию электрических и оптических свойств полученных кремниевых наносандвичей. Данные исследований ЦР и осцилляций Ааронова-Кашера демонстрируют, что наличие дипольных центров бора внутри δ -барьеров приводит к низким значениям эффективной массы двумерных дырок. Данный факт нашел

подтверждение при исследовании осциллиций Шубникова-де Гааза и де Гааза-ван Альфена в аналогичных наносандвичах, сильно легированных бором, на основе фторида кадмия и 6H-SiC *n*-типа. Благодаря низким значениям эффективной массы, а также малой ширине квантовой ямы, 2 нм, стало возможным идентифицировать энергетические позиции уровней квантования двумерных дырок в кремниевых наносандвичах при комнатной температуре посредством регистрации туннельных ВАХ высокого разрешения, демонстрирующих мезоскопические флуктуации проводимости. Полученные результаты хорошо согласуются с данными оптических методов регистрации спектров электролюминесценции и отражения. При этом обнаруженное 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 третьем параграфе представлены экспериментальные данные, которые идентифицируют наличие сверхпроводящих свойств кремниевых наносандвичей. Измерение температурных и полевых зависимостей удельного сопротивления, теплоемкости, магнитной восприимчивости, а также туннельных ВАХ показали, что δ -барьеры, ограничивающие СККЯ, демонстрируют свойства высокотемпературных сверхпроводников ($T_c = 145$ К, $H_{c2} = 0.22$ Т), которые, по-видимому, возникают в результате переноса дырочных биполяронов малого радиуса через дипольные центры бора на границе раздела кремниевая квантовая яма - δ -барьер. Следует отметить, что подрешетка дипольных центров определяет строение одноэлектронной зонной схемы, а именно наличие вблизи валентной зоны сильно легированных бором δ -барьеров сверхпроводящей энергетической щели, $2\Delta = 0.044$ эВ, ответственной за экспериментальное наблюдение процессов многократного Андреевского отражения.

В четвертой главе представлены результаты измерений продольного и поперечного (холловского) напряжения в зависимости от напряжения вертикального затвора при различных значениях стабилизированного тока исток-сток.

В первом параграфе приводятся результаты исследований по идентификации краевых каналов проводимости в кремниевых наносандвичах, которая стала возможной вследствие обнаружения дискретного изменения продольной проводимости, $Z \cdot 2e^2/h$, при увеличении стабилизированного продольного тока исток-сток, где Z принимает значения 2 и 0.7. При низких значениях стабилизированного тока исток-сток, $I_{ds} = 0.25$ нА, величина зарегистрированной продольной проводимости, $G_{xx} = 4e^2/h$, отражает вклад процессов многократного

Андреевского отражения в транспортные характеристики краевых каналов. Ранее это значение проводимости уже отмечалось в ряде работ при изучении углеродных нанотрубок и краевых состояний в графене [18,19]. Однако механизм, приводящий к реализации проводимости $G_{xx} = 4e^2/h$ в этих наноструктурах, до сих пор не ясен. С учетом того, что многократное Андреевское отражение является спиновзависимым процессом, который может способствовать возникновению спиновой поляризации в краевом канале, полученный результат объясняется в его рамках как перенос заряда $2e$ между δ – барьерами. При увеличении стабилизированного тока исток-сток, $I_{ds} = 0.5$ нА, в отсутствие электростатического ограничения впервые обнаружено значение продольной проводимости, соответствующее «0.7-особенности» квантовой лестницы проводимости, $G_{xx} = 0.7 \cdot (2e^2/h)$, что свидетельствует о спиновой поляризации дырок в краевых каналах кремниевых наносандвичей [9]. При дальнейшем возрастании стабилизированного тока исток-сток, $I_{ds} > 1$ нА, наличие спиновой поляризации дырок в краевых каналах позволило обнаружить осцилляции продольной проводимости Ааронова-Кашера, возникающие при изменении напряжения вертикального затвора, управляющего величиной спин-орбитального взаимодействия Бычкова-Рашбы [9]. При этом важным является тот факт, что при варьировании величиной напряжения вертикального затвора в диапазоне $\pm 2\Delta$ плотность двумерных дырок практически не меняется и составляет $p_{2D} = 1.1 \cdot 10^{14}$ м⁻². По этой причине обнаруженный эффект спинового транзистора исключает возможность маскирующего влияния фермиевских резонансов, наличие которых часто приводило к его ложному обнаружению.

Во втором параграфе показано, что благодаря наличию спиновой поляризации, в условиях низких значений стабилизированного тока исток-сток регистрируется ненулевая холловская разность потенциалов, зависящая от напряжения вертикального затвора. Стоит отметить, что при низких значениях стабилизированного тока исток-сток, кроме продольной проводимости, $G_{xx} = 4e^2/h$, обнаружена холловская проводимость, величина которой, $G_{xy} = e^2/h$, свидетельствует о регистрации квантового спинового эффекта Холла. Таким образом, процессы многократного Андреевского отражения, по всей видимости, выступают в качестве основного механизма спиновой поляризации носителей в краевых каналах.

Третий параграф посвящен теоретическому описанию квантового эффекта Холла в кремниевых наносандвичах при использовании много-терминальной модели парных одномерных топологических каналов, в которых носители имеют противоположную ориентацию спинов. Показано, что наблюдаемое в эксперименте при малых значениях стабилизированного тока исток-сток соотношение между значениями холловской и продольной проводимости, $G_{xy}/G_{xx} = 0.25$, согласуется с

результатами оценок, полученных в рамках формализма Ландауэра-Буттикера для системы поляризованных по спину краевых каналов.

В пятой главе рассматриваются возможности реализации джозефсоновского контакта в краевом канале кремниевого наносандвича в условиях кристаллографически ориентированного электрического поля.

В первом параграфе представлена модель краевых каналов, в основе которой лежат структурные свойства ограничивающих СККЯ δ -барьеров, представляющих собой самоупорядоченную систему одиночных тригональных дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией. Однако наличие напряжений, возникающих в наносандвиче на стадии предварительного окисления поверхности кремния (100), способствует возникновению структурного беспорядка на отдельных участках ориентированных вдоль кристаллографических осей $\{110\}$ цепочек тригональных дипольных центров бора. В случае, когда длина разупорядоченного участка цепочки меньше длины свободного пробега носителя тока, но достаточно велика для процесса двухчастичного туннелирования, в краевом топологическом сверхпроводящем канале реализуется квантовый точечный контакт. В условиях слабого тянущего поля исток-сток в краевом канале за счет процессов многократного Андреевского отражения возникает спиновая поляризация носителей, идентифицированная при регистрации «0.7-особенности». В рамках предлагаемой модели увеличение тянущего поля приводит к электростатическому упорядочению дипольных центров бора, в результате чего уменьшается длина квантового точечного контакта и соответственно возрастает вероятность двухчастичного туннелирования. Таким образом, квантовый точечный контакт может трансформироваться в одиночный джозефсоновский переход внутри сверхпроводящего краевого канала.

Во втором параграфе рассматривается подобная трансформация квантовых точечных контактов в джозефсоновские переходы при увеличении тянущего тока исток–сток, 5-20 нА, обнаруженная в процессе измерений продольных вольт-амперных характеристик. Полученные ВАХ демонстрируют наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), обусловленного генерацией электромагнитного излучения вследствие нестационарного эффекта Джозефсона [20]. В этом случае частота джозефсоновской генерации должна удовлетворять двум выражениям: $\nu = c/2nL$ и $\nu = 2eU/hN$. Здесь c – скорость света, n – коэффициент отражения диэлектрической прослойки ($n = 3.4$ для кремния), N – количество джозефсоновских переходов в цепочке, L – длина встроенного резонатора, необходимого для наблюдения эффекта ОДС. В кремниевых наносандвичах роль встроенного микрорезонатора выполняет холловская планарная структура, продольный размер которой, $L = 4.7$ мм,

соответствовал частоте генерации. Приведенные выше выражения позволяют оценить частоту генерации электромагнитного излучения и количество джозефсоновских переходов как $\nu = 9.3$ ГГц и $N = 2$. Кроме того, наличие микрорезонатора, встроенного в плоскость кремниевого наносандвича, способствовало регистрации ступеней Фиске, возникающих вследствие резонансного взаимодействия между переменным джозефсоновским током и стоячими электромагнитными волнами.

Третий параграф посвящен теоретическому описанию ступеней Фиске на ВАХ джозефсоновского перехода в кремниевых наносандвичах, которые регистрируются в лабораторном магнитном поле. В основе описания лежит взаимодействие между электромагнитными волнами, распространяющимися вдоль джозефсоновского контакта размера L со скоростью Свихарда, $c_s = 1.6 \cdot 10^7$ м/с, и переменным джозефсоновским током с частотой $\omega = 4\pi eU/h$. Ширина каждой ступени $\Delta U = (h/2e)c_s/2L$, тогда как высота нелинейно зависит от величины внешнего магнитного поля [21].

В четвертом параграфе представлены экспериментальные данные по обнаружению ступеней Шапиро на вольт-амперной характеристике кремниевого наносандвича, идентифицирующие наличие генерации электромагнитного излучения в гигагерцевом и терагерцевом частотном диапазонах. При этом в качестве источника излучения использовался идентичный кремниевый наносандвич в условиях пропускания малого стабилизированного тока исток-сток. Частота излучения, оцененная из ширины ступенек Шапиро, ΔU , $\nu = 2e\Delta U/h$, хорошо согласуется с данными измерений ступеней Фиске и участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Регистрация степеней Шапиро также, как и ступеней Фиске, стала возможной благодаря наличию в плоскости наносандвича встроенных микрорезонаторов, характеристики которых определяются геометрическими размерами холловской планарной структуры.

В Заключении приводятся основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обнаружено, что туннельная вольт-амперная характеристика (ВАХ) проводимости, демонстрирующая энергетические позиции подзон двумерных дырок в кремниевом наносандвиче, который представляет собой сверхузкую кремниевую квантовую яму p -типа, ограниченную сильно легированными бором δ -барьерами, на поверхности Si (100) n -типа, характеризуется наличием мезоскопических флукуаций.

2. На основании данных измерений продольной и поперечной (холловской) разности потенциалов в зависимости от напряжения на вертикальном затворе было зарегистрировано наличие в кремниевых наносандвичах краевых каналов проводимости. При этом рост стабилизированного тока исток-сток в интервале 0.25-5 нА последовательно проявляет:
 - а) значение продольной проводимости $G_{xx} = 4e^2/h$, обусловленное, по-видимому, вкладом многократного Андреевского отражения в транспорт дырок;
 - б) значение продольной проводимости $G_{xx} = 0.7 \cdot (2e^2/h)$, впервые зарегистрированное в краевых каналах двумерных структур в отсутствие электростатического ограничения и внешнего магнитного поля;
 - в) эффект спинового транзистора, который проявляется в наблюдении осцилляций продольной проводимости Ааронова-Кашера, возникающих при изменении напряжения вертикального затвора, управляющего величиной спин-орбитального взаимодействия Бычкова-Рашбы.
3. Обнаруженные эффекты свидетельствуют, что краевые каналы в кремниевых наносандвичах представляют собой сверхпроводящие проволоки, содержащие квантовые точечные контакты с высокой степенью спиновой поляризации дырок, наличие которой отражается в регистрации баллистической проводимости.
4. Благодаря наличию спиновой поляризации, в условиях низких значений стабилизированного тока исток-сток была зарегистрирована ненулевая холловская разность потенциалов, зависящая от напряжения вертикального затвора. Таким образом, данный результат является следствием квантового спинового эффекта Холла, который предсказывается в рамках модели топологических краевых состояний. Наблюдаемое при этом соотношение между значениями холловской и продольной проводимости составляет $G_{xy}/G_{xx} = 0.25$, что согласуется с результатами оценок, полученных в рамках формализма Ландауэра-Буттикера для системы парных одномерных топологических каналов, в которых носители имеют противоположную ориентацию спинов.
5. Показано, что квантовые точечные контакты внутри сверхпроводящих проволок способны трансформироваться при увеличении тянущего тока исток-сток, 5÷20 нА, в джозефсоновские переходы в краевых каналах. Полученные ВАХ демонстрируют наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, обусловленного генерацией электромагнитного излучения вследствие нестационарного эффекта Джозефсона. Кроме

того, зарегистрированы ступени Фиске вследствие резонансного взаимодействия между переменным джозефсоновским током и стоячими электромагнитными волнами в микрорезонаторе, встроенном в плоскость кремниевого наносандвича.

6. Обнаружены ступени Шапиро на ВАХ кремниевого наносандвича. В качестве источника гигагерцевого и терагерцевого излучения использовался идентичный кремниевый наносандвич в условиях пропускания малого стабилизированного тока исток-сток. При этом частота излучения, оцененная из ширины ступенек Шапиро, хорошо согласуется с данными измерений ступеней Фиске и участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hasan M.Z., Kane C.L., Colloquium: Topological insulators, *Rev. Mod. Phys.*, v.**82**, p.3045 (2010).
2. Xiao-Liang Qi, Shou-Cheng Zhang, Topological insulators and superconductors, *Rev. Mod. Phys.*, v.**83**, p.1057 (2011).
3. Buttiker M., Edge-state physics without magnetic fields, *Science*, v.**325**, p.278 (2009).
4. Bernevig B.A., Hughes T.L., Shou-Cheng Zhang, Quantum Spin Hall Effect and Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells, *Science*, v.**314**, p.1757 (2006).
5. Roth A., Brune C., Buhmann H., Molenkamp L.W., Maciejko J., Xiao-Liang Qi, Shou-Cheng Zhang, Nonlocal Transport in the Quantum Spin Hall State, *Science*, v.**325**, p.294 (2009).
6. Novoselov K.S., Jiang Z., Zhang Y., Morozov S.V., Stormer H.L., Zeitler V., Maan J.C., Boebinger G.S., Kim P., and Geim A.K., Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene, *Science*, v.**315**, p.1379 (2007).
7. Datta S., Das B., Electronic analog of the electro-optic modulator, *Appl. Phys. Lett.*, v.**56**, p.665 (1990).
8. König M., Wiedmann S., Brüne C., Roth A., Buhmann H., Molenkamp L.W., Xiao-Liang Qi, Shou-Cheng Zhang, Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells, *Science*, v.**318**, p.766 (2007).
9. Bagraev N.T., Galkin N.G., Gehlhoff W., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Phase and amplitude response of “0.7 feature” caused by holes in silicon one-dimensional wires and rings, *J. Phys.: Condens. Matter*, v.**20**, p.164202 (2008).
10. Баграев Н.Т., Гимбицкая О.Н., Клячкин Л.Е., Кудрявцев А.А., Маляренко А.М., Романов В.В., Рыскин А.И., Щеулин А.С.,

Квантовый спиновый эффект Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия, *ФТП*, т.44, с.1372 (2010).

11. Захарченя Б.П., Коренев В.Л., Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику, *УФН*, т.175, вып.6, стр.629 (2005).
12. Кусраев Ю.Г., Спиновые явления в полупроводниках: физика и приложения, *УФН*, т.180, вып.7, стр.759 (2010).
13. Meier F., Zakharchenya V.P. (Eds), *Optical Orientation*, North-Holland, Amsterdam, 1984.
14. Тарасенко С.А., Спиновые фототоки в полупроводниках, *УФН*, т.180, вып.7, стр.773 (2010).
15. Buttiker M., Absence of backscattering in the quantum Hall effect in multiprobe conductors, *Phys. Rev. B*, v.38, p.9375 (1988).
16. Datta S., *Electronic transport in mesoscopic systems*, Cambridge, University Press, 1995.
17. Ghosh A., Ford C. J. B., Pepper M., Beere H. E., and Ritchie D. A., Possible Evidence of a Spontaneous Spin Polarization in Mesoscopic Two-Dimensional Electron Systems, *Phys. Rev. Lett.*, v.92, p.116601 (2004).
18. Jarillo-Herrero P., van Dam J.A., Kouwenhoven L.P., Quantum supercurrent transistors in carbon nanotubes, *Nature*, v.439, p.953 (2006).
19. Heersche H.B., Jarillo-Herrero P., Oostinga J.B., Vandersypen L.M.K., Morpurgo A.F., Bipolar supercurrent in graphene, *Nature*, v.446, p.56 (2007).
20. Ozyuzer L., Koshelev A. E., Kurter C., Gopalsami N., Li Q., Tachiki M., Kadowaki K., Tamamoto T., Minami H., Yamaguchi H., Tachiki T., Gray K. E., Kwok W. K., Welp U., Emission of coherent THz radiation from superconductors, *Science*, v.318, p.1291 (2007).
21. Кулик И.О., Теория "ступеней" вольт-амперной характеристики туннельного тока Джозефсона, *Письма в ЖЭТФ*, т.2, вып.3, стр.134 (1965).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Bagraev N.T., Mashkov V.A., Danilovsky E.Yu., Gehlhoff W., Gets D.S., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Kuzmin R.V., Malyarenko A.M., Romanov V.V., EDSR and ODMR of Impurity Centers in Nanostructures Inserted in Silicon Microcavities, *Applied Magnetic Resonance*, v.39, p.p.113-135 (2010).
2. Bagraev N.T., Danilovsky E.Yu., Gehlhoff W., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Kuzmin R.V., Malyarenko A.M., Romanov V.V., Quantum supercurrent transistors in silicon quantum wells confined by

- superconductor barriers, *Journal of Modern Physics*, v.2, p.p.256-273 (2011).
3. Bagraev N.T., Mashkov V.A., Danilovsky E.Yu., Gehlhoff W., Gets D.S., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Kuzmin R.V., Malyarenko A.M., Romanov V.V., EDESР and ODMR of impurity centers in nanostructures inserted in silicon microcavities, *Journal of Modern Physics*, v.2, p.p.544-558 (2011).
 4. Баграев Н.Т., Даниловский Э.Ю., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Машков В.А., Спиновая интерференция дырок в кремниевых наносандвичах, *ФТП*, т.46, вып.1, стр.77-89 (2012).
 5. Баграев Н.Т., Брилинская Е.С., Даниловский Э.Ю., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Романов В.В., Эффект де Гааза - ван Альфена в наноструктурах фторида кадмия, *ФТП*, т.46, вып.1, стр.90-95 (2012).