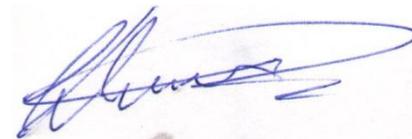


На правах рукописи



Клячкин Леонид Ефимович

Спиновая интерференция в кремниевых наноструктурах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Научный консультант доктор физико-математических наук, Баграев Николай Таймуразович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Калашников Евгений Владимирович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет просвещения, кафедра вычислительной математики и информационных технологий, профессор, Москва.

доктор физико-математических наук, профессор Мошников Вячеслав Алексеевич, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра микро- и наноэлектроники, профессор, Санкт-Петербург.

доктор физико-математических наук Полозков Роман Григорьевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфорова Российской академии наук», кафедра высшей математики и физики, заведующий кафедрой, Санкт-Петербург.

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

Защита состоится 22 октября 2024 года в 16:00
на заседании диссертационного совета У.1.3.8.34
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
и на сайте https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-doctor-of-science/klyachkin_leonid_efimovich
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого».

Автореферат разослан 16 июля 2024 года

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н. Крупина М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Создание низкоразмерных структур, в которых реализуется квантовый транспорт носителей заряда, является перспективным направлением в развитии быстродействующей высокопроизводительной электроники. Разработки в этом направлении базируются на достижениях нанофизики и нанотехнологии квантово-размерных структур, в которых наблюдаются эффекты размерного квантования, квантовая интерференция, осуществляется баллистический транспорт и одноэлектронное туннелирование носителей заряда. Кроме того, в последние десятилетия особое внимание уделялось развитию такого направления нанофизики, как спинтроника, в рамках которой изучались эффекты квантового спинозависимого транспорта, в частности - квантовая спиновая интерференция и спиновый транзистор.

Однако, несмотря на значительные успехи в нанофизике и криоэлектронике, на мировом рынке отсутствуют полупроводниковые приборы, в которых осуществляется квантовый транспорт носителей заряда. Переход от дрейфового режима работы квантово-размерных структур к квантовому режиму оказался весьма сложной задачей, несмотря на использование новых материалов [1]. Причем квантовые макроскопические эффекты практически не используются в современных разработках наноэлектроники.

Использование квантового транспорта, а также применение переходов Джозефсона в промышленной наноэлектронике, не дали ожидаемого результата, поскольку их работа возможна лишь при низких температурах. Попытки использования в наноэлектронике, как неклассических сверхпроводников (ВТСП), так и гибридных наноструктур, представляющих собой сочетание сверхпроводников с полупроводником, тоже не увенчались успехом, что в большой степени связано со значительными трудностями получения на их основе p-n – переходов [2].

Следует отметить, что для практической реализации характеристик

квантового транспорта необходимо использовать низкие температуры, в первую очередь для подавления электрон-электронного взаимодействия (ЭЭВ). Частично данная проблема была решена при исследовании характеристик графеноподобных систем, которые, как оказалось, способны демонстрировать макроскопические квантовые эффекты даже при комнатной температуре. Известно, что ЭЭВ в наноструктурах при высоких температурах (около 300 К) пагубно сказывается не только при осуществлении квантового транспорта, но и в дрейфовом режиме. Во всех известных на сегодняшний день технологических разработках рекордные значения подвижности носителей заряда в полупроводниковых наноструктурах были получены при низких температурах, а при повышении температуры до 300 К подвижность резко падала из-за снижения времени релаксации носителей за счет ЭЭВ.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод об особой роли границ квантовых объектов, поскольку именно вблизи них ЭЭВ происходит с наибольшей интенсивностью. Иными словами, необходимое условие реализации квантового транспорта при высоких температурах – это эффективное подавление ЭЭВ.

Степень разработанности темы

Поиски решения данной проблемы привели к развитию нового направления в нанофизике, в котором активно исследуются свойства топологических сверхпроводников и изоляторов [3, 4]. Также как и в классической физике полупроводников и диэлектриков топологический изолятор имеет объемную запрещенную зону, разделяющую энергетические спектры зоны проводимости и валентной зоны. Но, кроме этого, на поверхности трехмерных и на краях двумерных топологических изоляторов обнаруживаются бесщелевые состояния, которые возникают благодаря различным комбинациям спин-орбитального взаимодействия. В этих условиях может возникать спиновая интерференция носителей, характеристики которой управляемы с помощью внешнего воздействия

путем варьирования электрическим и магнитным полями. Таким образом, появляется возможность говорить о реализации квантового транспорта в условиях спиновой интерференции [4]. Краевые топологические каналы (КК) экспериментально были обнаружены в квантовых ямах HgTe/CdTe и InAs/GaSb, а также на поверхности трехмерных структур $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , и Sb_2Te_3 [3].

Изменяя число подзон двумерной структуры, например, варьируя величиной магнитного поля, можно добиться возникновения в ней проводящих краевых каналов, благодаря чему регистрируется целочисленный квантовый эффект Холла и другие квантовые макроскопические эффекты [5]. Это послужило основанием для дальнейших широких исследований, направленных на создание и изучение двумерных структур с краевыми каналами. Причем основное внимание исследователей сосредоточилось на изучении краевых состояний в топологических изоляторах, как наиболее перспективных объектах, в которых может быть реализован квантовый транспорт, поскольку в таких структурах ЭЭВ не должно существенно влиять на краевые состояния, так как в них формируются пространственно разделенные одномерные КК, содержащие носители с противоположной ориентацией спинов. Перспективность применения топологических систем для решения проблем квантового транспорта в низкоразмерных структурах была подтверждена экспериментально обнаружением квантового спинового эффекта Холла без приложения внешнего магнитного поля [6].

В последнее время рассматриваются методы, позволяющие нивелировать негативное влияние границ низкоразмерных структур, которое усиливает ЭЭВ. К таким методам относится использование оболочек, состоящих из d- и f-подобных примесных центров [7], а также - центров с отрицательной корреляционной энергией (negative-U) [8-10]. Причем negative-U центры представляют собой реконструированные примесные диполи, $D^+ - D^-$, в присутствии которых подавляется ЭЭВ вследствие их

взаимодействия с носителями в КК.

Таким образом, использование подобных оболочек КК, является одним из перспективных способов для наблюдения макроскопических квантовых эффектов при высоких температурах. Также следует отметить, что это открывает перспективы получения и исследования топологических изоляторов на основе классических полупроводников. Очевидно, что в краевых каналах, ограниченных цепочками negative-U примесных диполей, будет эффективно подавляться ЭЭВ. Следствием использования negative-U оболочек является возникновение спиновой поляризации носителей в КК, что открывает перспективы для создания спинового транзистора на основе классических полупроводников и, тем самым, способствует развитию высокотемпературной спинтроники. Причем наличие встроенного p-n перехода в КК создает возможность управления спин-орбитальным взаимодействием.

Отличие кремниевых наносандвич (КНС) структур от большинства используемых низкоразмерных систем на основе классических полупроводников заключается в том, что сверхузкая квантовая яма, ограниченная КК, представляет собой p-область p-n перехода, что позволяет использовать различные сочетания магнитных, электрических и оптических методик для изучения характеристик спиновой интерференции.

Цель диссертационного исследования - изучение характеристик спиновой интерференции в кремниевых наносандвич (КНС) структурах на поверхности монокристаллического кремния Si n-типа, которые представляют собой квантовые ямы (КЯ) p - типа, ограниченные цепочками примесных центров с отрицательной корреляционной энергией.

Задачи исследования

1) экспериментально реализовать КНС структуры, содержащие одиночную сверхузкую квантовую яму p-типа проводимости, краевые каналы которой ограничены оболочками, состоящими из цепочек примесных центров с отрицательной корреляционной энергией (negative-U);

2) исследовать транспортные характеристики в условиях спиновой интерференции носителей в краевых каналах КНС структуры, возникающие вследствие захвата одиночных квантов магнитного потока;

3) обнаружить и исследовать одиночные точечные центры в краевых каналах кремниевой квантовой ямы с помощью классического электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), электрического детектирования электронного парамагнитного резонанса (ЭДЭПР) и оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) при высоких температурах вплоть до комнатной без применения внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ;

4) обнаружить и исследовать квантовую лестницу проводимости в краевых каналах кремниевой квантовой ямы, возникающей в условиях спиновой интерференции;

5) исследовать вклад СОВ Бычкова – Рашбы и спонтанной спиновой поляризации дырок в спин-зависимые транспортные явления в краевых каналах КНС;

6) исследовать поведение осцилляций Ааронова-Кашера продольной проводимости краевых каналов кремниевой квантовой ямы в зависимости от напряжения вертикального затвора, которые демонстрируют эффект спинового полевого транзистора;

7) исследовать транспортные фазовые сдвиги характеристик краевых каналов КНС с помощью интерферометра Ааронова-Бома, которые возникают в условиях спиновой интерференции.

Научная новизна

1. Получены КНС структуры, содержащие одиночную квантовую яму, краевые каналы которой заключены в $negative-U$ оболочки, что обеспечивает в них высокое время релаксации одиночных носителей заряда в условиях подавления электрон-электронного взаимодействия.

2. Обнаружены и исследованы ЭПР, ЭДЭПР и ОДМР одиночных точечных центров в краевых каналах кремниевой квантовой ямы при

высоких температурах вплоть до комнатной без применения внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ.

3. Продемонстрирован эффект полевого спинового транзистора при исследовании осцилляций Ааронова-Кашера продольной проводимости краевых каналов кремниевой квантовой ямы в зависимости от напряжения вертикального затвора, управляющего величиной спин–орбитального взаимодействия.

4. Обнаружена квантовая лестница проводимости в краевых каналах кремниевой квантовой ямы, возникающая в условиях захвата одиночных квантов магнитного потока.

5. Обнаружены фазовые сдвиги в характеристиках интерферометра Ааронова – Бома, возникающие благодаря эффекту Оверхаузера, индуцированному в результате сверхтонкого взаимодействия ядерных моментов ^{29}Si с одиночными носителями, туннелирующими через квантовый точечный контакт, встроенный в краевой канал КНС.

Практическая значимость работы

1. Экспериментальная реализация КНС структур, в краевых каналах которых осуществляется квантовый транспорт одиночных носителей заряда при высоких температурах, благодаря эффективному подавлению ЭЭВ вследствие наличия negative-U оболочек.

2. Разработка методик регистрации ЭПР, ЭДЭПР и ОДМР одиночных точечных центров в краевых каналах кремниевой квантовой ямы при высоких температурах вплоть до комнатной без применения внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ.

3. Демонстрация эффекта полевого спинового транзистора при высокой температуре (77К).

Методология и методы исследования

Экспериментальная реализация вышеуказанных целей и задач данного диссертационного исследования требует проведения всесторонних исследований, поскольку КНС структура, является объектом исследования,

проявляющим разнообразные свойства, которые открывают перспективы его применения в различных областях нанофизики. Поэтому в данной работе применялся широкий круг экспериментальных методов, используемых в современной физике конденсированного состояния. Для исследования магнитного резонанса использовались методы классического циклотронного резонанса (ЦР) и его оптического (ОДЦР) и электрического (ЭДЦР) детектирования, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и его оптического (ОДМР) и электрического (ЭДЭПР) детектирования. Исследования спиновой интерференции проводились с помощью современной методики с использованием интерферометра Ааронова-Бома. Для изучения влияния на спиновую интерференцию поля Оверхаузера применялись методы оптической поляризации ядер и электрической регистрации ядерного магнитного резонанса (ЯМР). При проведении экспериментов для сбора данных применялся язык графического программирования LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), а для обработки больших массивов данных и построения графиков использовался программный продукт Origin 8.

Положения, выносимые на защиту

1. Условия паритета механизмов примесной диффузии обеспечивают формирование наносандвич – структуры, представляющей собой одиночную сверхузкую квантовую яму р-типа, краевые каналы которой ограничены цепочками negative-U примесных центров.

2. Оболочки краевых каналов квантовой ямы, состоящие из цепочек примесных центров с отрицательной корреляционной энергией, обеспечивают высокое время релаксации одиночных носителей вследствие подавления электрон-электронного взаимодействия.

3. Реализация характеристик спиновой интерференции позволяет регистрировать ЭПР, ЭДЭПР и ОДМР одиночных точечных центров в краевых каналах кремниевой квантовой ямы при высоких температурах вплоть до комнатной без применения внешнего резонатора, источника и

приемника СВЧ.

4. В условиях спиновой интерференции в краевых каналах кремниевой квантовой ямы реализуется квантовая лестница проводимости вследствие захвата одиночных квантов магнитного потока.

5. Осцилляции Ааронова-Кашера продольной проводимости краевых каналов кремниевой квантовой ямы в зависимости от напряжения вертикального затвора, управляющего величиной спин–орбитального взаимодействия, проявляют эффект полевого спинового транзистора.

6. Сверхтонкое взаимодействие одиночных носителей заряда, туннелирующих через встроенный в краевой канал КНС квантовый точечный контакт, с ядерными моментами ^{29}Si индуцирует эффект Оверхаузера, что приводит к дополнительному фазовому сдвигу в характеристиках интерферометра Ааронова – Бома.

7. Оптическая ядерная поляризация моментов ^{29}Si определяет характеристики кремниевых интерферометров Ааронова – Бома.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных экспериментальных методов исследования с использованием высокоточной измерительной техники, а также разнообразием применяемых исследовательских методов, подтверждающих полученные результаты. Кроме того, достоверность подтверждается хорошим совпадением полученных экспериментальных результатов с расчетными значениями.

Вклад автора в решение поставленных задач состоит в разработке и формулировании цели работы, определении направлений экспериментальных исследований и их практической реализации.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, были представлены на:

- 4й, 5й и 6й Международных конференциях по диффузии в материалах (DIMAT'96, Nordkirchen, Germany, 1996; DIMAT'2000, Paris, France, 2000; DIMAT'2004, Krakow, Poland, 2004);

- 5й и 6й Международных конференциях по геттерированию и дефектной инженерии в полупроводниковой технологии (GADEST V, Klingemühle, Germany, 1993; GADEST VI, Wulkow, Germany, 1995);

- 23й, 26й, 28й, 29й, 31й, 32й, 33й и 34й Международных конференциях по физике полупроводников (ICPS-23, Berlin, Germany, 1996; ICPS-26, Edinburgh, U.K., 2002; ICPS-28; Vienna, Austria, July 24-28, 2006; ICPS-28, Rio, Brasil, 2008; ICPS-31, Zurich, Switzerland, 2012; ICPS-32, Austin, USA, 2014; ICPS-33, Beijing, China, 2016; ICPS-34, Montpellier, France, 2018);

- 18й, 19й, 20й, 21й, 22й, 25й, 27й и 28й Международных конференциях по дефектам в полупроводниках (ICDS-18, Sendai, Japan, 1995; ICDS-19, Aveiro, Portugal, 1997; ICDS-20, Berkeley, USA., 1999; ICDS-21, Giessen, Germany, 2001; ICDS-22, Aarhus, Denmark, 2003; ICDS-25, St. Petersburg, Russia, 2009; ICDS-27, Bologna, Italy, July 28-August 2, 2013; ICDS-28, Espoo, Finland, 2015);

- 9й Международной конференции по сверхрешеткам, микроструктурам и микроприборам (ICSMM9, Liege, Belgium, 1996);

- 7й Международной конференции по мелким центрам в полупроводниках (SLCS-96, Amsterdam, the Netherlands, 1996);

- 14й, 17й и 20й Международных конференциях по электронным свойствам двумерных систем (EP2DS-14, Praha, Czech Republic, 2001; EP2DS-17, Genoa, Italy, 2007; EP2DS-20, Wroclaw, Poland, 2013);

- 10й, 13й и 16й Международных конференциях по модулированным полупроводниковым структурам (MSS-10, Linz, Austria, 2001; MSS-13, Genoa, Italy, 2007; MSS-16, Wroclaw, Poland, 2013);

- 4й и 11й Международных конференциях по физике взаимодействия света и вещества в наноструктурах (PLMCN-4, St. Petersburg, Russia, 2004; PLMCN-11, Berlin, Germany, 2011)

- Международной конференции по сильно коррелированным электронным системам (SCES '05, Vienna, Austria, 2005);

- 9й Международной конференции по нанофизике и технологии

(ICN&T 2006 - NANO9 meets STM'6, Basel, Switzerland, 2006);

- 10й Международной конференции по наноструктурированным материалам (NANO2010, Roma, Italy, 2010);

- 8й Международной конференции «Кремний -2011» (Moscow, Russia, 2011);

- 10й Российской конференции по физике полупроводников (Нижний Новгород, Россия, 2011).

Публикация результатов исследований

По теме диссертации опубликованы 48 печатных работ в российских и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК.

Основное содержание работы

Во **введении** сформулированы цель, задачи диссертационной работы и положения, выносимые на защиту. Обоснованы ее актуальность, научная и практическая значимость, научная новизна и достоверность полученных результатов. Указан личный вклад автора и апробация диссертационной работы.

В **Главе 1** рассматриваются диффузионные механизмы получения КНС структур, основным элементом которых является одиночная сверхузкая (2 нм) кремниевая квантовая яма р-типа проводимости, образованная на поверхности монокристаллического кремния п-типа. КЯ КНС ограничена δ -барьерами, которые состоят из цепочек negative-U примесных центров. Также в Главе 1 приведены различные экспериментальные исследования, подтверждающие эффективное подавление ЭЭВ в краевом канале квантовой ямы КНС. Кроме того, показано, что в КЯ КНС реализуется режим топологического диэлектрика с проводящими парными краевыми каналами, одиночные носители в которых имеют противоположную ориентацию спинов.

Параграф 1.1 посвящен исследованию процессов создания КНС структур в условиях конкуренции вакансионного и kick-out механизмов примесной диффузии (Рисунок 1). Проведенные исследования показали, что

управляя потоками вакансий и собственных междуузельных атомов в технологических процессах сухого термического окисления и последующей низкотемпературной (900°C) диффузии бора, возможно, добиться реализации условий равновесия вакансионного и kick-out механизмов диффузии примеси, что приводит к формированию сверхмелких примесных профилей на поверхности монокристаллов Si (100) (Рисунок 1b).

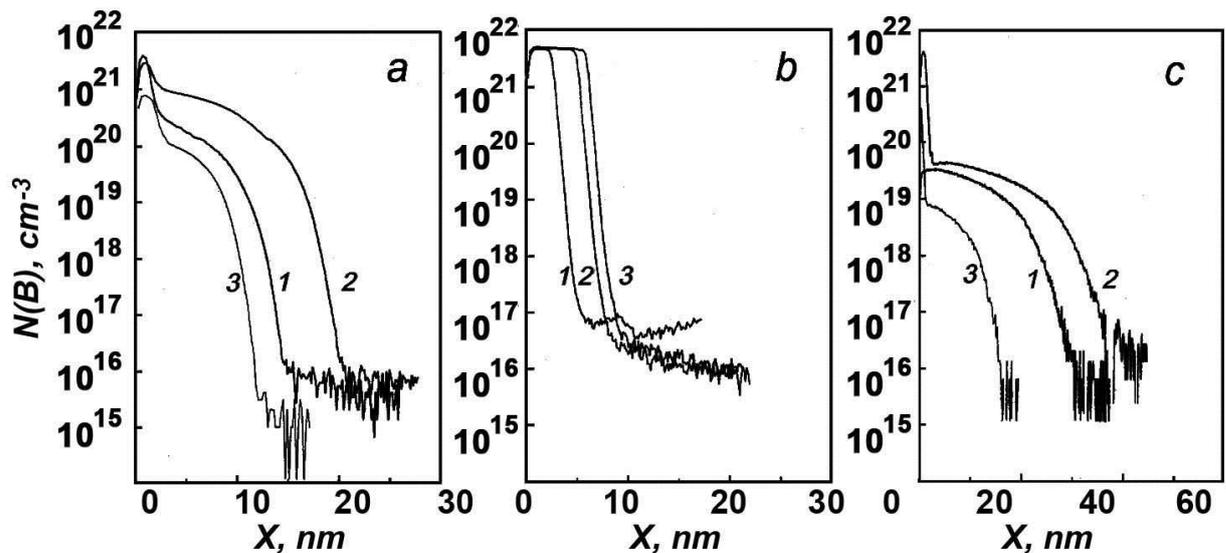


Рисунок 1. Зависимости концентрации бора от глубины проникновения в диффузионных профилях, полученных методом вторичной ионной масс-спектрометрии при температурах диффузии 800°C (a), 900°C (b) и 1100°C (c) в Si(100)-подложку n-типа ($N(\text{P})=2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) через окна в предварительно выращенном слое SiO_2 толщиной: 1 – 220 нм; 2 – 720 нм; 3 – 1100 нм.

В **Параграфе 1.2.** представлены результаты исследований КНС структур методами классического ЦР (Рисунок 2a), а также ОДЦР и ЭДЦР. В результате проведенных исследований обнаружено, что КНС структуры содержат одиночную продольную квантовую яму, ограниченную δ -барьерами (Рисунок 2b), которые в свою очередь состоят из тригональных примесных negative-U диполей B^+-B^- . Такая структура КНС подтверждается результатами исследований угловых зависимостей классического ЦР (с помощью ЭПР спектрометра (X-band, 9.1 - 9.5 ГГц)), поскольку в них проявляется не только тензор эффективной массы, но также гашение и сдвиг

линий ЦР (а именно их анизотропия по амплитуде при вращении образца), которые имеют 180° -ую симметрию при ориентации магнитного поля параллельно плоскости сверхмелкого профиля.

Обнаруженные спектры ЦР состоят из необычно узких линий, что свидетельствует о значительном увеличении времени спин-решеточной релаксации неравновесных электронов и дырок (для тяжелых дырок $\tau \approx 5 \cdot 10^{-10}$ с, для легких дырок $\tau \approx 5 \cdot 10^{-10}$ с и для электронов $\tau \approx 7 \cdot 10^{-10}$ с) в самоупорядоченных кремниевых КЯ в сравнении с аналогичными данными для объемных монокристаллов кремния.

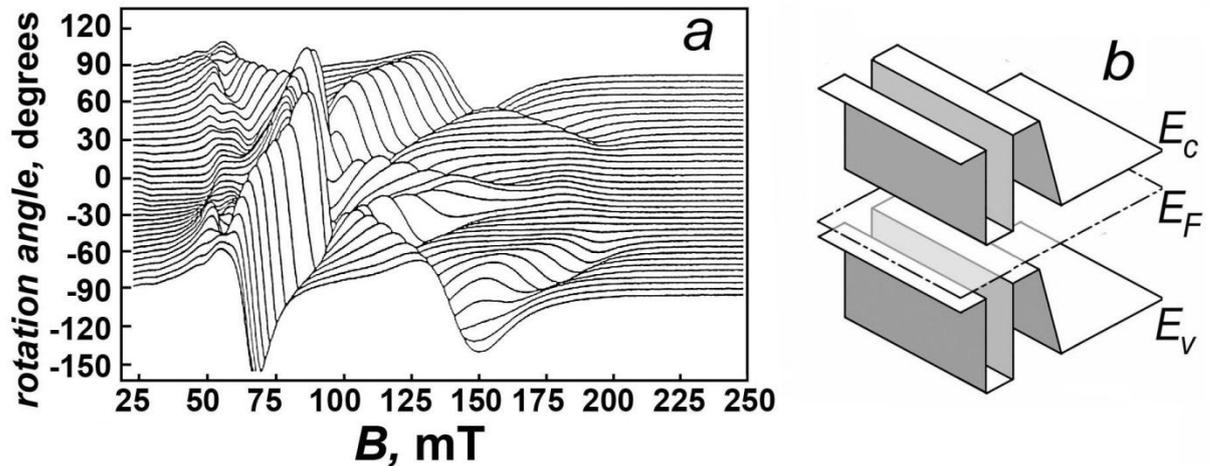


Рисунок 2. а - Угловые зависимости циклотронного резонанса носителей тока в КНС структурах, полученных при $T_{\text{diff}} = 900^\circ\text{C}$ на поверхности Si(100). $T = 3,9$ К, $\nu = 9,45$ ГГц. Внешнее магнитное поле приложено в плоскости (110), перпендикулярной (100)-поверхности образца. 0° и $\pm 90^\circ$ – соответствуют направлениям магнитного поля параллельно и перпендикулярно поверхности образца. б - Трехмерная диаграмма одноэлектронной зонной схемы КНС структуры, содержащей с одиночную продольную КЯ р-типа.

При исследовании ОДЦР в КНС структурах, наблюдалось усиление фотолюминесценции (ФЛ) при значениях энергии, соответствующих известным D1 и D2 линиям дислокационной люминесценции (Рисунок 3). Полученные результаты рассмотрены в рамках модели кремниевой

оборванной связи, учитывающей взаимосвязанность электрон-колебательного взаимодействия и зарядовых/спиновых корреляций.

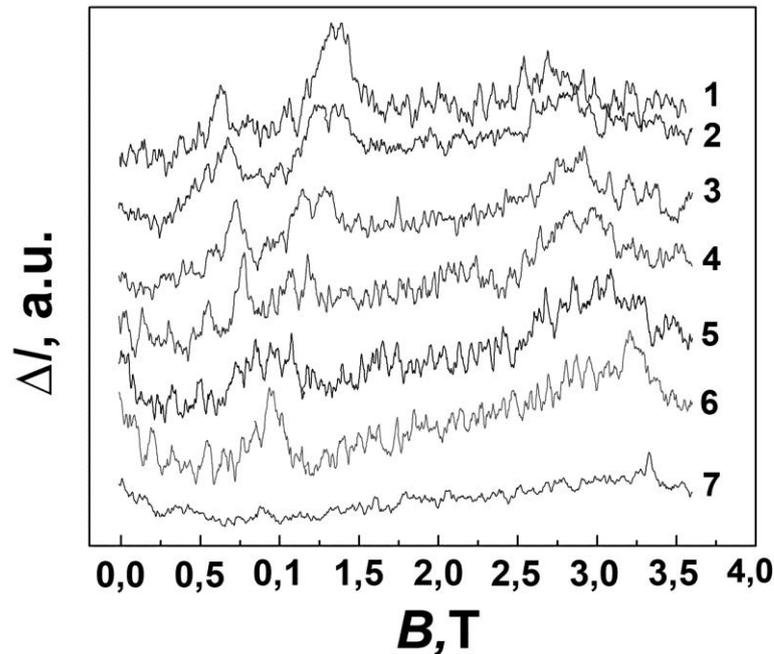


Рисунок 3. Угловые зависимости спектров ОДЦР, зарегистрированные по изменению интенсивности линии ФЛ 875 meV при вращении экспериментальной структуры в плоскости (110). Θ – угол между направлением магнитного поля и осью [100], т.е., нормалью к поверхности Si (100) *n*-типа, в плоскости которой получен КНС, ориентированный в направлении [011]. Кривые с $\Theta = 0^\circ$ (1); 10 (2); 20 (3); 30 (4); 40 (5); 50 (6) и 60 (7) получены при вращении поля в плоскости (110). $\nu = 94$ ГГц, $T = 2$ К.

При исследованиях ЭДЦР в КНС структурах регистрировалось изменение магнетосопротивления КНС при протекании стабилизированного тока вдоль КЯ (Рисунок 4а). Расчетные значения эффективной массы, полученные из экспериментальных исследований ЭДЦР (Рисунок 4б), находятся в хорошем соответствии с результатами исследований классического ЦР в объемных монокристаллах кремния.

В параграфе 1.3 представлены результаты экспериментов, анализ которых свидетельствует о реализации в КЯ КНС режима топологического диэлектрика с проводящими парными краевыми каналами, одиночные носители в которых имеют противоположную ориентацию спинов.

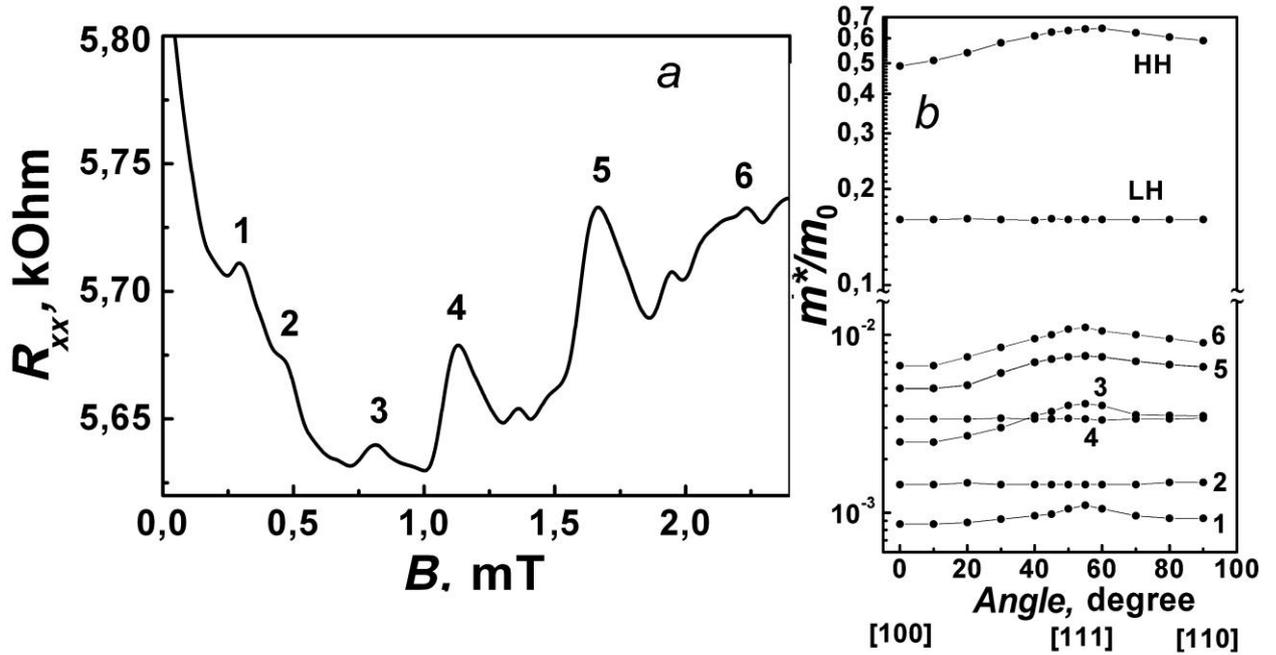


Рисунок 4. а - Магнетосопротивление в КНС, полученное при $T = 77$ К. $B \parallel [100]$; б - Рассчитанные из положения пиков ЭДЦР угловые зависимости эффективной массы легких и тяжелых дырок в КЯ КНС. Зависимости 1 – 6 соответствуют линиям квантового ЦР на Рисунке 2а. Зависимости НН и ЛН соответствуют тяжелой и легкой дыркам для случая полного заполнения кремниевой КЯ.

Результаты исследований полевых и температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости КНС продемонстрировали ярко выраженный диамагнетизм (особенно в слабых полях и при низких температурах). Полученный экспериментальный результат однозначно свидетельствует о диамагнетизме сильнолегированных δ -барьеров, ограничивающих самоупорядоченные кремниевые квантовые ямы. С помощью метода ЭПР было обнаружено возбужденное парамагнитное состояние диполей ($V^+ - V^-$), формирующих сильнолегированные δ -барьеры и представляющие собой negative-U центры, обладающие C_{3v} симметрией (Рисунок 5).

При исследовании проводимости КНС структур было обнаружено синусоидальное тушение продольного тока в зависимости от величины приложенного магнитного поля, доказывающее наличие квантового точечного контакта в краевых каналах, причем данный эффект

зарегистрирован при высокой температуре 77 К. Экспериментальное обнаружение квантового точечного контакта является неопровержимым доказательством подавления ЭЭВ в КК одиночной продольной КЯ в КНС при высоких температурах.

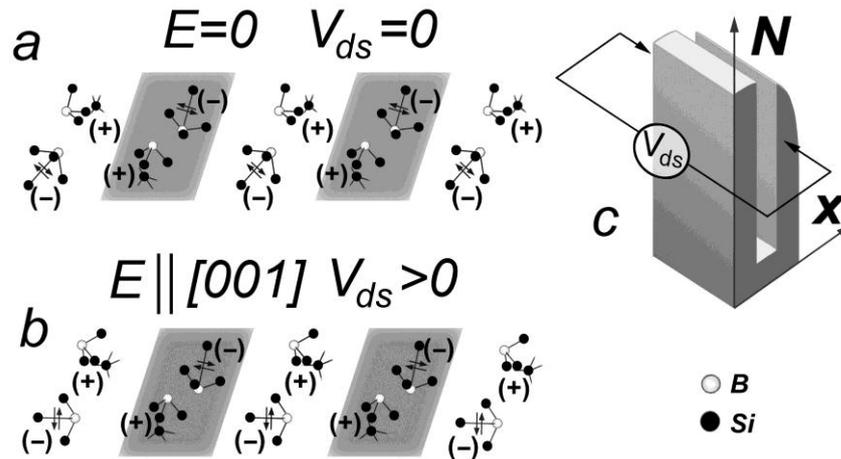


Рисунок 5. Тригональные дипольные negative-U центры B^+B^- внутри δ -барьеров (a), которые формируют при приложении внешнего электрического поля условия поперечного ограничения (b) для переноса носителей тока в самоупорядоченной кремниевой КЯ. (c) – Трехмерное изображение сверхмелкого примесного профиля, содержащего одиночную кремниевую КЯ, ограниченную negative-U δ -барьерами.

Глава 2 посвящена исследованиям транспортных характеристик в условиях спиновой интерференции носителей в краевых каналах КНС структуры, возникающих вследствие захвата одиночных квантов магнитного потока.

При проведении электрических измерений в экспериментальной КНС структуре, выполненной в холловской геометрии, было обнаружено, что при продольном протекании тока в системе с КК происходит захват одиночных квантов магнитного потока на одиночные носители заряда в КК, и реализуется эффект электромагнитной индукции, который проявляется при исследовании зависимостей U_{xx} , U_{xy} и U_{pn} от амплитуды внешнего магнитного поля.

В **Главе 3** представлены результаты исследования ЭПР, ЭДЭПР и

ОДМР одиночных точечных центров в краевых каналах кремниевой квантовой ямы при высоких температурах вплоть до комнатной без применения внешних СВЧ-источников, СВЧ-приемников и резонаторов.

В **параграфе 3.1** рассматриваются особенности методики ЭДЭПР - и ОДМР - исследований одиночных точечных дефектов, внедренных в КЯ, при осуществлении режима квантовой спиновой интерференции одиночных носителей в КНС в вышеуказанных условиях.

В предлагаемой методике регистрации магнитного резонанса КНС структура используется в качестве ЭПР-спектрометра, причем возможность наблюдения ЭПР достигается за счет следующих свойств КНС:

1) КНС представляет собой ограниченную negative-U δ -барьерами сверхузкую (2 nm) кремниевую КЯ р-типа проводимости, сформирован на поверхности кремниевой монокристаллической подложки n-типа, и содержит встроенные фрактальные микрорезонаторы.

2) Благодаря реализации эффекта электромагнитной индукции, при котором происходит захват одиночных квантов магнитного потока на пиксели краевых каналов, содержащих одиночные носители заряда внутри краевых каналов, в условиях приложения напряжения в КНС возникает индукционный генерационный ток (I_{ind}), характеристики которого можно контролировать с помощью латеральных контактов в рамках холловской геометрии. I_{ind} способствует возникновению в КНС высокочастотного излучения.

Таким образом, создаются условия для регистрации ЭПР путем измерения проводимости / магнетосопротивления (ЭДЭПР), а также ОДМР путем анализа характеристик фото- и электролюминесценции.

Параграф 3.2 посвящен ЭДЭПР точечных центров в процессе измерений магнетосопротивления в КНС структуре.

В процессе исследования магнетосопротивления КНС при температуре жидкого азота были зарегистрированы две линии ЭПР фосфора с зазором 4.1 мТ, свидетельствующие о наличии сверхтонкого взаимодействия ($I=1/2$).

Вследствие спин-зависимого рассеяния данные линии имеют сложную структуру фаз и интенсивностей (Рисунки ба и б). Высокая чувствительность предлагаемого метода ЭДЭПР, заключающегося в простом измерении зависимостей $R_{xx} = f(B)$, подтверждается обнаружением ЭДЭПР - спектра центра NL8, выявляющего остаточные термодоноры (состояние TD^+) кислорода в кремниевой КЯ КНС (Рисунки ба и б) [11]. Необходимо отметить, что исследования КНС обычным методом ЭПР также позволили обнаружить этот центр орторомбической симметрии. Данный спектр ЭДЭПР, по-видимому, идентифицирует водородосодержащий термодонор в кремниевой КЯ р-типа, поскольку его характерное расщепление 23 МГц свидетельствует о наличии водорода в составе данного центра [12]. Важно отметить различную фазу линий, происходящих от сверхтонкого взаимодействия с водородом, что, по-видимому, является результатом высокой спиновой поляризации.

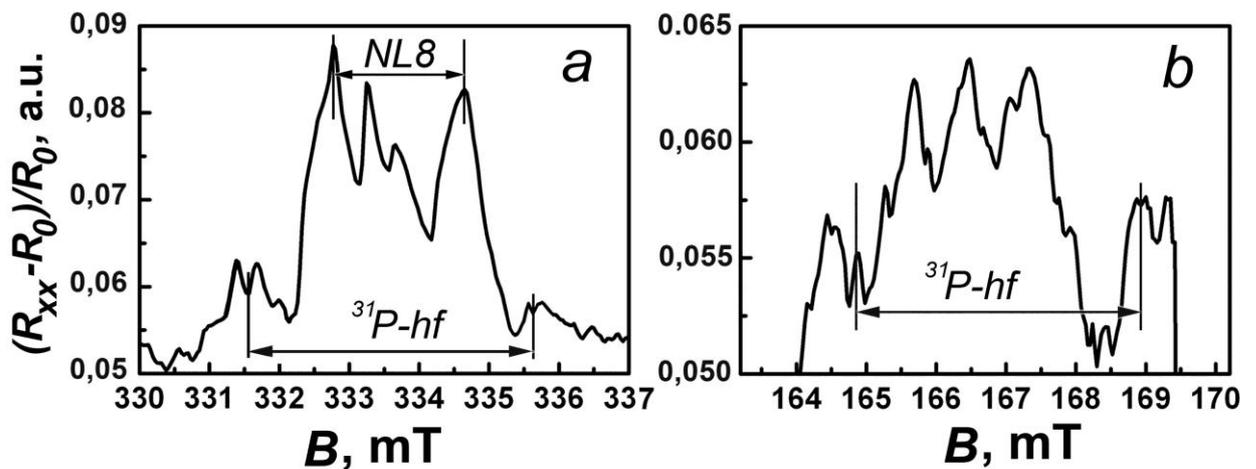


Рисунок 6. а - ЭДЭПР фосфора, NL8 и связанных с водородом центров в кремниевой КЯ, ограниченной δ -барьерами, который идентифицирован при измерении магнетосопротивления без применения внешних элементов СВЧ техники (резонатора, приемника и источника излучения). $T=77$ К. $\nu=9,3$ ГГц. $B \parallel \langle 100 \rangle$ и $\perp \{100\}$. Выявленное центральными линиями расщепление на частоте 23 МГц обусловлено присутствием водорода. б – проявление второй гармоники ЭДЭПР.

Рассматриваемый здесь метод ЭДЭПР обладает высокой чувствительностью. Эта особенность позволяет проводить исследования в слабых магнитных полях, что важно для измерения расщепления МР центров с высоким g-фактором, внедренных в КЯ. Именно эти преимущества послужили основанием для проведения экспериментов по применению данного метода ЭДЭПР на кремниевых образцах с КНС структурами на поверхности для исследования поведения специально вводимых в технологическом цикле дополнительных примесей редкоземельных элементов (в частности эрбия). Известно, что легированный эрбием кремний уже много лет является перспективным материалом для создания быстрых высокоэффективных излучателей (на основе Er^{3+} внутрицентрового 4f - перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) с длиной волны 1.54 мкм, соответствующей спектральной области минимума потерь оптоволоконных линий [13].

Для проведения экспериментов были приготовлены специальные образцы на основе кремниевой подложки n – типа проводимости с ориентацией (100), в которые перед заключительным этапом технологии формирования КНС (перед диффузией бора) проводилась длительная диффузия эрбия в условиях доминирования вакансионного механизма при температуре 1100°C. После этой технологической операции проводилось формирование КНС структур, аналогичных используемым в вышеописанных экспериментах.

Основой регистрации ЭДЭПР и ОДМР (обсуждается далее), которые обусловлены спин-зависимым рассеянием 2D-дырок, является низкая концентрация центров эрбия. Обнаруженные из угловых зависимостей ЭДЭПР - спектра тригональная симметрия центра эрбия и значение его g – фактора (4.82) позволили сделать вывод о его сходстве с эрбиевым центром, изучаемым классическим методом ЭПР [14].

Компоненты сверхтонкой ($I=7/2$) эрбиевой структуры демонстрируют расщепление каждой из них еще на четыре линии (Рисунок 7а), что однозначно указывает на наличие бора в обнаруженном тригональном

дипольном центре. По-видимому, такое расщепление представляет собой расщепления линии бора ($I=3/2$), который образует negative-U тригональные центры $B^+ - B^-$, являющиеся основой δ -барьеров. Исходя из полученных результатов, возможно моделировать эрбиевый центр в кремниевой КЯ р-типа как одиночный дипольный центр $B^+ - Er^-$ (Рисунок 7b), который возникает при замещении эрбием одного из двух атомов бора в negative-U тригональном дипольном центре $B^+ - B^-$. При этом парамагнитное состояние центра $B^+ - Er^-$ по-видимому, возникает при захвате на него двумерных дырок в условиях квантового транспорта в краевых каналах КНС (Рисунок 7c).

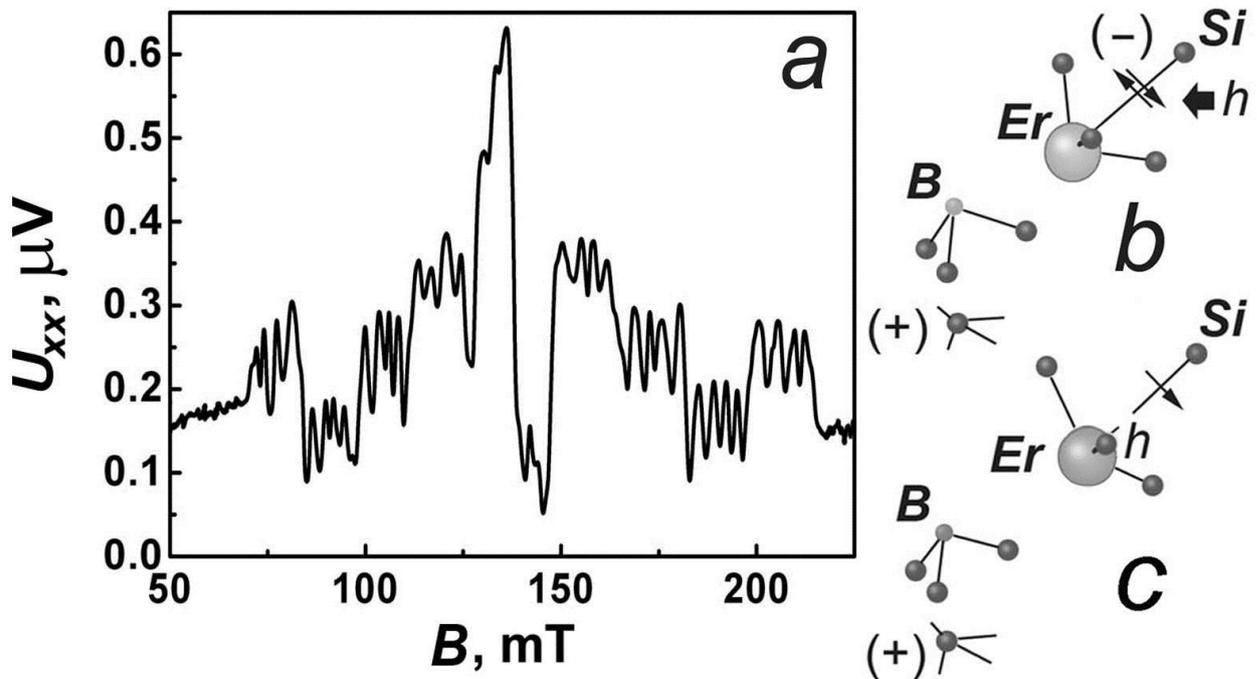


Рис. 7. а - ЭДЭПР тригонального центра эрбия, внедренного в кремниевую квантовую яму КНС, зарегистрированный без применения внешних элементов СВЧ техники (резонатора, приемника и источника излучения) при измерении магнетосопротивления при $T=77$ К. $\nu=9,3$ ГГц. $B \parallel \langle 100 \rangle$ и $\perp \{100\}$. Модель тригонального дипольного бор-эрбиевого центра (b) с парамагнитным состоянием, создаваемым захватом двумерных дырок (c) в кремниевой КЯ, ограниченной δ -барьерами.

В Параграфе 3.3 внимание уделено отрицательному магнетосопротивлению в условиях ЭПР.

Все проанализированные выше результаты исследования

магнетосопротивления проявляются, по-видимому, благодаря тому, что спин-поляризованные дырки подвержены спин-зависимому рассеянию на одном или нескольких парамагнитных центрах в КК квантовой ямы КНС. К такому заключению можно прийти, поскольку данные исследования проводились при отсутствии инжекции носителей из контактов и какой-либо подсветки. Заметим, что в КК квантовой ямы КНС свободные спин-поляризованные 2D-дырки подвержены упругому рассеянию на случайном статическом потенциале, благодаря чему осуществляется их диффузионное квантовое движение. При таком упругом рассеянии, не зависящем от спина, фаза дырочной волновой функции отображает только чисто геометрический вклад, и при этом сохраняется фазовая память. Таким образом, в этих условиях для дырочного транспорта реализуется режим слабой локализации.

Чувствительность предлагаемой методики позволяет регистрировать МР одиночных центров, поскольку режим спиновой интерференции позволяет выявлять фазовые изменения в краевых каналах КНС.

Параграф 3.4 посвящен ОДМР точечных дефектов в КНС структуре. Данный метод МР базируется на изучении спектров пропускания и электролюминесценции (ЭЛ) КНС структур.

В **разделе 3.4.1** рассмотрен ОДМР точечных дефектов, возникающих в процессе формирования КНС, таких как углерод - водород акцепторный центр, тригональные пары железо-бор, а, в **разделе 3.4.2** - центра эрбия, специально внедренного в КНС в технологическом цикле вышеописанным способом.

При исследовании спектров пропускания проявлялась фрактальная система кремниевых микрорезонаторов, которые позволяют идентифицировать поляритоны, возникающие из-за связи нормальной моды экситона с одиночной КЯ в каждом 1 мкм кремниевом микрорезонаторе, путем изменения значения угла между нормалью к поверхности Si(100) и осью микрорезонатора. Появление поляритонов, по-видимому, обусловлено как рождением связанных экситонов, так и внутризонными дырочными

переходами в КЯ. Однако спектры пропускания с угловым разрешением свидетельствуют о доминирующей роли внутризонных дырочных переходов в формировании спектральной области расщепления Раби из-за малой величины энергии взаимодействия (Рисунок 8).

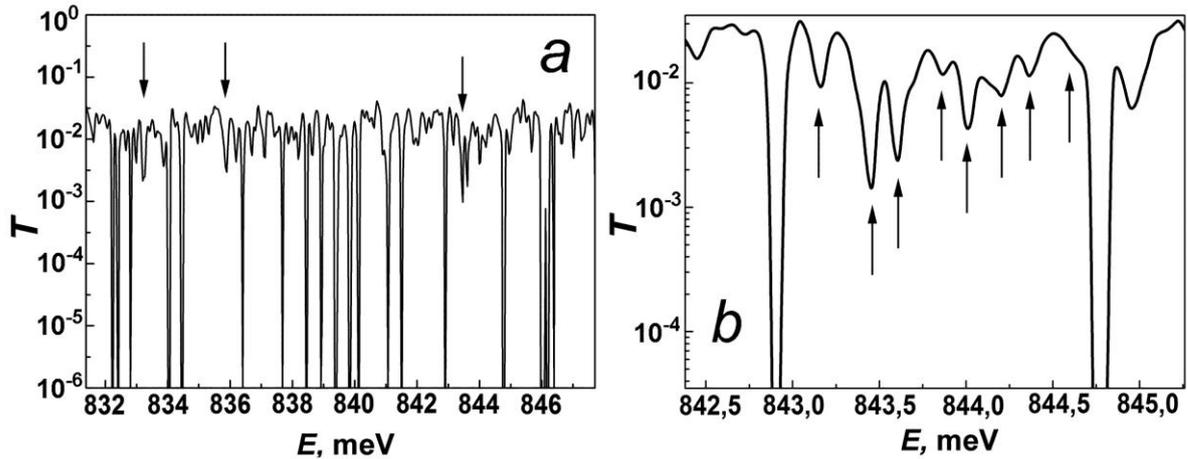


Рисунок 8. Спектры пропускания, демонстрирующие внутрицентровое мультиплетное поглощение ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ Er^{3+} тригонального эрбиевого центра, встроенного в квантовую яму КНС (а), демонстрирующие сверхтонкие переходы ($J=7/2$) в режиме ОДМР в диапазоне расщепления Раби (b). $T=300$ К.

Было обнаружено, что оптически индуцированные внутризонные переходы в КЯ, выявляемые по угловым зависимостям расщепления Раби в спектрах пропускания, вызывают Оже-возбуждение ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и, соответственно, Er^{3+} -внутрицентровое поглощение. Сильная связь КЯ, по видимому, обусловлена встроенным электрическим полем сверхмелких p⁺-n-переходов, что приводит к эффекту Келдыша, ответственному за разброс резонансных длин волн до 1,6 мкм.

Проведенные исследования показали, что встроенное электрическое поле порождает эффект Штарка, возмущающий p-f-смешивание, вызванное локализацией двумерных дырок на связанных с Er центрах в КЯ. Это пространственное ограничение p-состояний и локализованных состояний f-электронов должно быть усилено сжатием КЯ, что приводит к высокой эффективности поглощения при комнатной температуре без какого-либо

тушения, что является прямым следствием расширенного диапазона между квантово-размерными состояниями. Таким образом, максимальная эффективная передача энергии наблюдается при ширине КЯ, равной 2 нм, при значении ширины запрещенной зоны s-p-электронов, равной 2,6 эВ. Более того, сильная связь между f-состояниями эрбиевого центра и s-p-состояниями основной КЯ позволила зафиксировать высокоэффективную ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ЭЛ (которая характеризуется E_r^{3+} мультиплетной структурой (Рисунок 9а)) (число линий при этом соответствует тригональной структуре эрбиевого центра (Рисунок 9б)) при высокой температуре (300 К). Кроме того, наличие такой сильной sp-f связи является причиной возникновения гигантского обменного расщепления даже в нулевом внешнем магнитном поле.

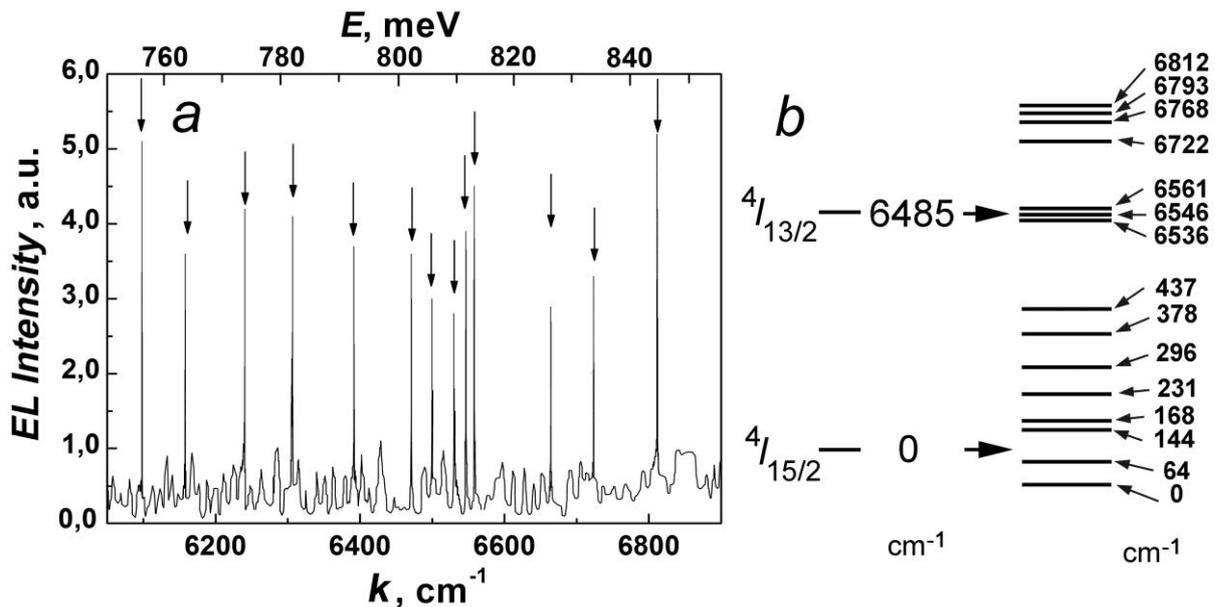


Рисунок 9. Спектр электролюминесценции, обусловленный внутри-центровым излучением ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ E_r^{3+} квантовой ямы КНС, легированной эрбием (а). Диаграмма уровней энергии для тригональных центров, связанных с эрбием, полученная из данных пропускания и электролюминесценции (б).

Анализ экспериментальных зависимостей коэффициента пропускания от длины волны в области Раби - расщепления, которые представляют собой

ОДМР ($\nu \approx 200$ GHz) в отсутствие внешнего магнитного поля и в условиях рождения поляритонов, подтверждает сильное смешивание (sp-f) состояний КЯ и Eg^{3+} , поскольку число линий (8) сверхтонкой структуры эрбий-содержащего центра ($I=7/2$) совпадает с числом линий, наблюдаемых в экспериментах (Рисунок 8b). Наблюдаемое в угловых зависимостях спектров коэффициента пропускания гигантское сверхтонкое расщепление, возможно, возникает вследствие оболочечной поляризации эрбий-содержащего тригонального центра, которая, в свою очередь, обусловлена сильной локализацией s-p-состояний в сверхузкой КЯ КНС.

Глава 4 посвящена изучению спиновой поляризации носителей в КК в КНС структурах. Ранее в Параграфе 3.1 было показано, что КК исследуемой КНС структуры состоит из областей интерференции одиночных носителей (пикселей) и, учитывая значение их двумерной плотности, определенное из холловских измерений, $3 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$, длина пикселя приблизительно равна 16 мкм, причем сопротивление одиночного носителя в пикселе квантовано и составляет h/e^2 . Кроме того, была экспериментально обнаружена спиновая поляризация одиночных носителей в КК, и был сделан вывод о том, что КК являются парными, и носители в них имеют противоположную ориентацию спинов. Очевидно, что в таких КК одиночные носители имеют возможность интерферировать как на всем КК (или его части), так и внутри одиночного пикселя, поскольку носители с разным спином под действием поля движутся навстречу друг другу по противоположным сторонам пикселя.

В **Параграфе 4.1** представлены экспериментальные результаты исследования проводимости КК в условиях спиновой интерференции в зависимости от величины смещения на поперечном затворе XY КНС структуры в нулевом магнитном поле при температуре 77 К. Полученная зависимость $G_{xx} = f(V_{xy})$ представляет собой квантовую лестницу проводимости (КЛП), проявляющую особенность $0,7 \cdot (2e^2/h)$ [15], что свидетельствует о спонтанной спиновой поляризации дырок в КК (Рисунок 10). Показано, что КЛП возникает благодаря электромагнитной индукции

Фарадея. Аналогичный эффект в тех же условиях получен при варьировании напряжения, приложенного к вертикальному затвору, управляющего изменением двумерной плотности дырок в КК квантовой ямы КНС.

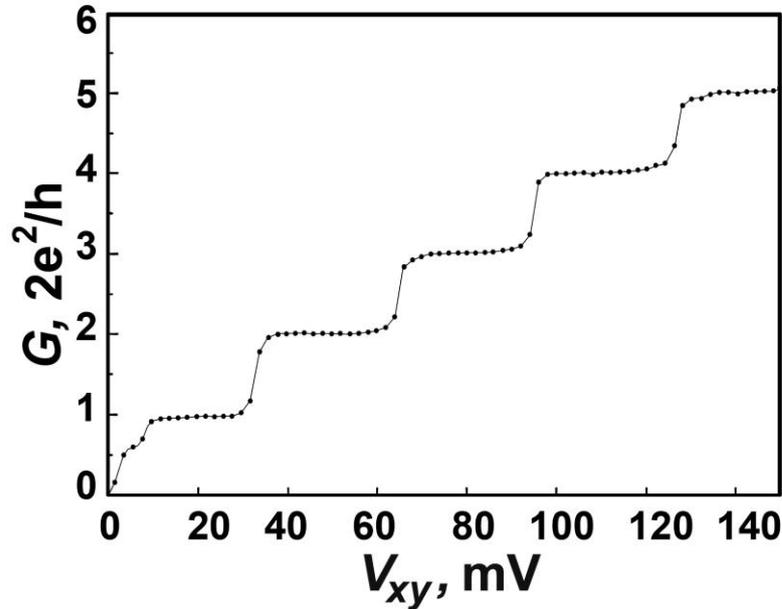


Рисунок 10. Квантовая лестница проводимости двумерных дырок, полученная при изменении напряжения на поперечном затворе (V_{xy}) КНС в отсутствие внешнего магнитного поля. $T = 77$ К.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в **Параграфе 4.2**, позволяют ответить на вопрос о том, какой вклад в возникновение $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенности вносят СОВ Бычкова – Рашбы [16] и спонтанная спиновая поляризация. Для выявления СОВ Бычкова - Рашбы проводились экспериментальные исследования магнитопроводимости с варьированием напряжения на вертикальном затворе V_g , поскольку при этом появляется возможность управлять СОВ Бычкова - Рашбы и, соответственно, спиновой поляризацией дырок в краевом канале.

При варьировании величиной V_g наблюдалось изменение поведения экспериментальных зависимостей магнитопроводимости от положительного магнетосопротивления к отрицательному (переход ПМС \Rightarrow ОМС), что подтверждает переход от режима слабой антилокализации к режиму слабой локализации, который осуществляется при изменении плотности 2D - дырок.

Экспериментальные зависимости соответствуют теоретически предсказанным результатам и соответствуют данным экспериментальных исследований магнитопроводимости в квантовой яме $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ с высокой подвижностью электронов [17]. Тем не менее, рост положительной части магнетосопротивления при очень низких значениях величины ρ_{2D} скорее всего является следствием спонтанной спиновой поляризации.

Доказательством этого является спиновое расщепление дырок 0,044 эВ в 1D-газе (Рисунок 11), которое было обнаружено в результате анализа экспериментальных зависимостей магнитопроводимости от разворачиваемого на вертикальном затворе напряжения V_g .

Таким образом, в результате проведенных экспериментов была обнаружена взаимосвязь между спонтанной спиновой поляризацией дырок и СОВ Бычкова - Рашбы, приводящая к относительным вкладам обоих явлений в спин-зависимый транспорт двумерных дырок в краевых каналах КНС.

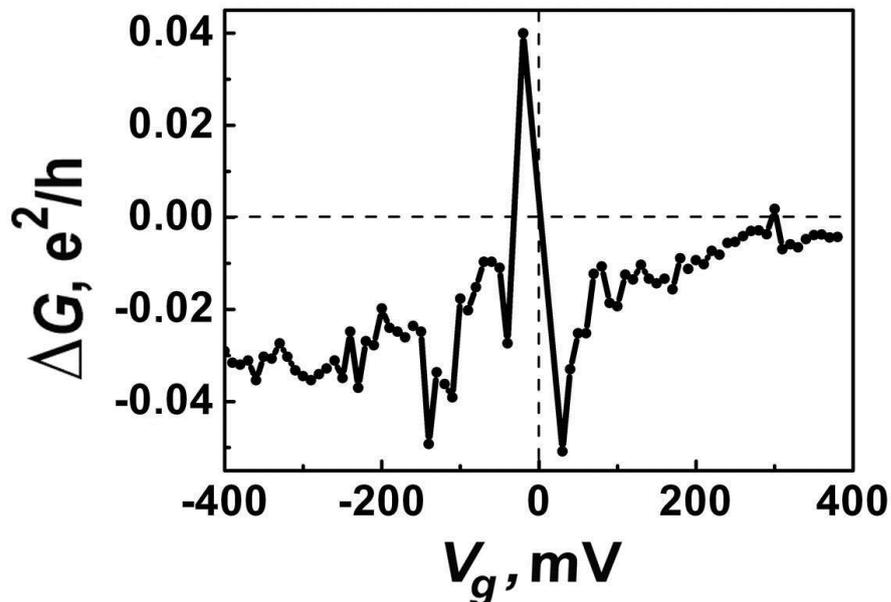


Рисунок 11. Проводимость ΔG как функция напряжения на вертикальном затворе, приложенного к краевому каналу КНС. $B=5,5 \cdot 10^{-3}$ мТ. $T=77$ К.

В **Параграфе 4.3** описаны эксперименты по определению относительного вклада СОВ Бычкова - Рашбы в квантовый транспорт в КНС,

которые проводились при варьировании напряжения на вертикальном затворе V_g в таком диапазоне, в котором двумерная концентрация дырок p_{2D} в КК столь мала, что практически не зависит от величины V_g . Эти условия позволили избежать в экспериментах влияния эффекта изменения p_{2D} при варьировании величины V_g , и, тем самым, доказать взаимосвязь СОВ Бычкова - Рашбы с наличием $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенности в КЛП краевых каналов КНС. Были исследованы зависимости проводимости от амплитуды напряжения, приложенного к вертикальному затвору V_g , при различных значениях амплитуды внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно поверхности КНС, что привело к идентификации осцилляций Ааронова-Кашера (АК) (Рисунок 12).

Анализ осцилляций проводимости АК с учетом зависимости двумерной плотности дырок p_{2D} от величины напряжения на вертикальном затворе V_g позволил определить значения эффективной массы дырок m_{eff} в зависимости от величины их двумерной плотности p_{2D} . Полученные значения хорошо согласуются с представленными в Параграфе 1.2, полученными из исследований ЦР.

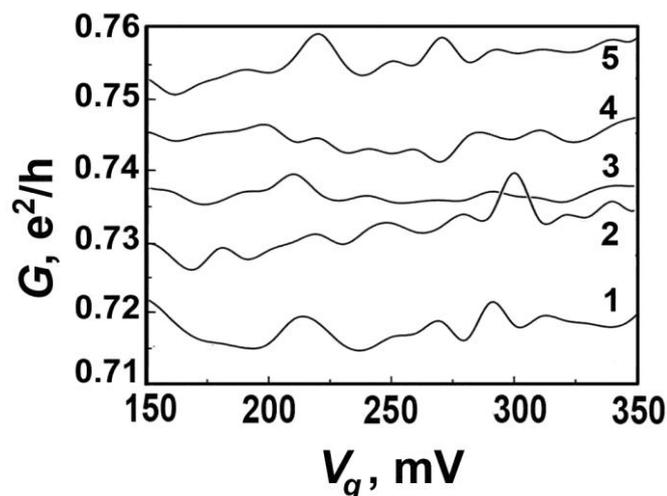


Рисунок 12. Осцилляции проводимости Аронова-Кашера в краевом канале КНС, полученные при $T = 77$ К. Диапазон изменения амплитуды внешнего магнитного поля: 0,05 (кривая 1) - 0,45 мТ (кривая 5). Шаг 0,1 мТ. Зависимости 2-5 смещены для наглядности на величину $(0,00775 e^2/h) \cdot n$, где n - номер кривой.

В **Параграфе 4.4** продемонстрирован эффект полевого спинового транзистора (Рисунок 13) в КК в КНС структуре при высокой температуре ($T=77$ К), который проявляется в виде осцилляций АК проводимости КК в зависимости от напряжения вертикального затвора, управляющего величиной СОВ Бычкова – Рашбы. Одновременно с этим эффектом экспериментально зарегистрирован эффект Ааронова-Бома (АБ), который реализуется в условиях фиксации напряжения, приложенного к вертикальному затвору. При этом осцилляции проводимости наблюдаются при варьировании амплитуды внешнего магнитного поля, которое направлено перпендикулярно поверхности КНС. Регистрация эффекта АБ служит одним из главных доказательств реализации баллистического транспорта двумерных дырок в структуре спинового транзистора. Наблюдение обоих эффектов стало возможным благодаря высокой степени спиновой поляризации дырок и большому времени их спиновой релаксации вследствие крайне малой ширины кремниевой КЯ и узости ее краевых каналов, что обеспечивается свойствами ограничивающих их negative-U оболочек.

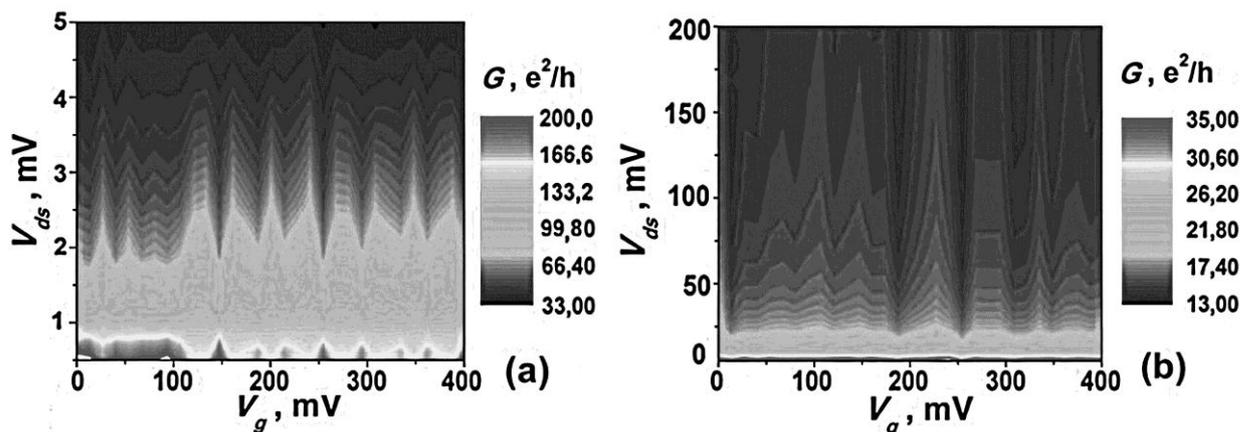


Рисунок 13. Диаграммы, демонстрирующие тушение осцилляций АК в отсутствие внешнего магнитного поля при нарастании напряжения V_{ds} , что вызывает разогрев и, соответственно, спиновую релаксацию двумерных дырок в условиях транспорта параллельно плоскости КНС. $T=77$ К.

В Главе 5 рассмотрены эффекты, возникающие в квантовом интерферометре Ааронова – Бома, сформированном на основе КНС структуры (Рисунок 14а).

Известно, что в низкоразмерных системах при исследовании магнитоосцилляций ШдГ в гетероструктурах HgCdTe/HgTe/HgCdTe [18] наблюдались фазовые сдвиги равные π . Аналогичный фазовый сдвиг пропускания (ФСП) возникает в квантовом транспорте в двухщелевом интерферометре АБ при когерентном туннелировании носителей через квантовую точку (КТ), встроенную в одно из его плеч [19]. Поскольку в такой системе квантовая интерференция определяется процессами кулоновской перезарядки квантовой точки, а не фазовыми изменениями в процессе транспорта и изменениями спиновой поляризации носителей, для изучения фазовых соотношений в рамках интерферометра АБ необходимы эксперименты, которые однозначно установили бы их взаимосвязанность с характеристиками спиновой интерференции носителей. Поэтому, для реализации этой цели была изготовлена КНС структура в топологии интерферометра АБ, в одном из плеч которого создавался КТК с помощью методики расщепленного затвора.

В Параграфе 5.1 представлены экспериментально полученные фазовые соотношения квантового транспорта в квазиодномерных каналах КНС в области $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенности КЛП (Рисунок 14b). Было обнаружено, что фазовый сдвиг колебаний АБ (Рисунок 14c), измеренный в заданных точках КЛП, приводит к возникновению ФСП при прохождении носителями через КТК, встроенный в квазиодномерный канал КЯ, причем фаза для последовательных ступеней КЛП демонстрирует подъем на π вблизи начала плато баллистической проводимости. В слабых магнитных полях при значениях напряжения на поперечном затворе V_{xy} вблизи $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенности КЛП отклонение периода колебаний АБ от ожидаемого значения вызывает дополнительный фазовый сдвиг, равный

$\pi/2$ (Рисунок 14d).

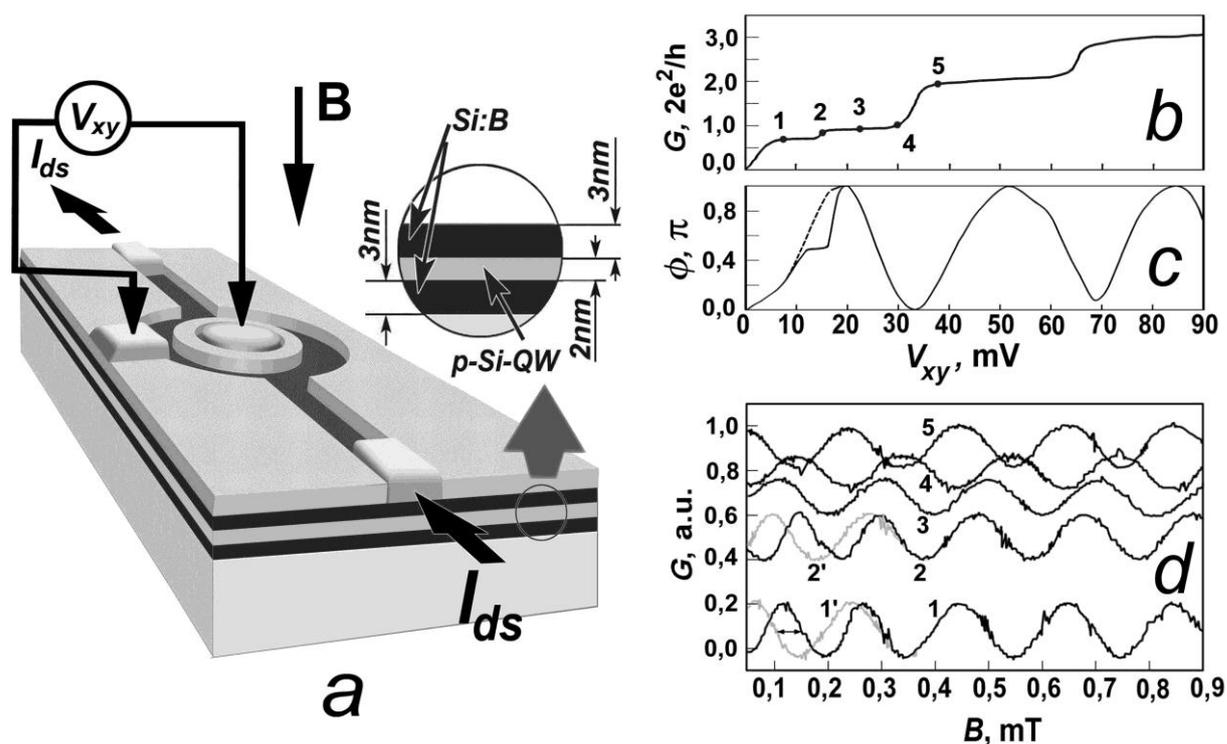


Рисунок 14. (a) — интерферометр Ааронова – Бома на основе КНС; (b) - Квантовая лестница проводимости в краевом канале КНС, сформированном в геометрии интерферометра АБ, демонстрирующая $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенность в отсутствие внешнего магнитного поля. (c) – Изменения фазы коэффициента пропускания КК, рассчитанные из позиций осцилляций АБ. Диапазон B : 0,05 - 0,35 мТ (сплошная линия); 0,35 - 0,9 мТ (пунктирная линия). (d) - Серия осцилляций проводимости АБ, снятых в заданных положениях на квантовой лестнице проводимости 1D канала на поверхности КНС. Осцилляции АБ, отмеченные цифрами 1' и 2', демонстрируют рассогласование периодов из-за смещения Оверхаузера, которое полностью подавляется при ЯМР-насыщении ядер ^{29}Si . $f_0 = 850$ Гц; $B_1 = 5,0 \cdot 10^{-5}$ мТ ($1 \rightarrow 1'$; $2 \rightarrow 2'$).

Обнаруженный дополнительный фазовый сдвиг, равный $\pi/2$, исчезает не только при увеличении магнитного поля (Рисунок 14d, кривые 1' и 2'). Он также не обнаруживается и в малых магнитных полях в условиях насыщения ЯМР ядер ^{29}Si (Рисунок 15a).

Экспериментально было показано, что данный эффект является результатом сверхтонкого взаимодействия одиночных носителей заряда, туннелирующих через встроенный в краевой канал КТК, с ядерными

моментами ^{29}Si , которое индуцирует эффект Оверхаузера, что и приводит к дополнительному фазовому сдвигу. ФСП краевых каналов КНС зависит от степени спиновой поляризации носителей и изменяется от $\pi/2$ до π с увеличением внешнего магнитного поля, перпендикулярного к интерферометру АБ и/или напряжения на поперечном затворе вследствие подавления ЭЭВ. Обнаружено, что воздействие на образец частотой ЯМР-насыщения ядер ^{29}Si приводит к подавлению поляризации атомов решетки, а, соответственно, и к подавлению воздействующего на дырку поля ядер ^{29}Si , сдвига Оверхаузера и дополнительного фазового сдвига, равного $\pi/2$, что однозначно объясняет возникновение последнего за счет спиновой поляризации носителей.

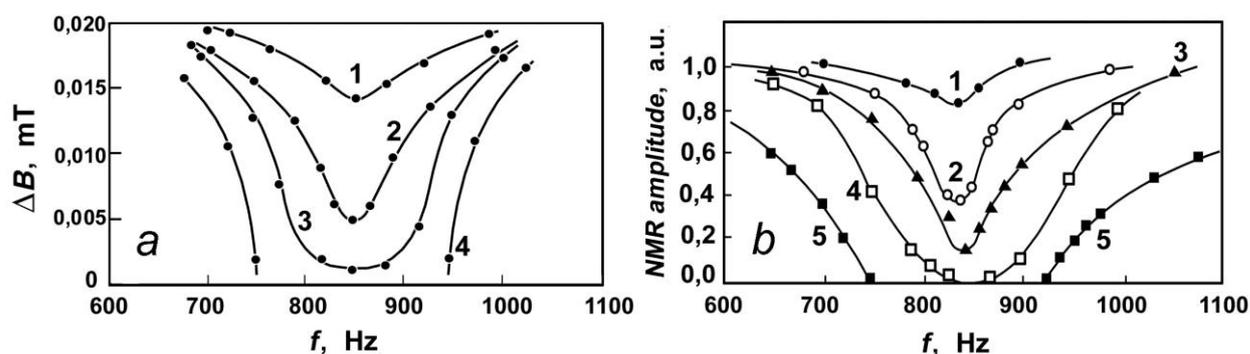


Рисунок 15. (а) Электрически зарегистрированный спектр ЯМР ядер ^{29}Si , который показывает сдвиг Оверхаузера, вызывающий рассогласование периодов осцилляций АБ в слабых магнитных полях (а). $B_0 = 0,157 \text{ мТ}$; $V_{xy} = 7,5 \text{ мВ}$; $B_1, (\text{мТ})$: 1- $0,4 \cdot 10^{-5}$, 2- $1,0 \cdot 10^{-5}$, 3- $2,0 \cdot 10^{-5}$, 4- $5,0 \cdot 10^{-5}$.

(б) Спектр ЯМР ядер ^{29}Si , полученный методом оптически индуцированной поляризации ядер в монокристалле кремния, легированном фосфором [20]. $B_0 = 0,157 \text{ мТ}$; $B_1, (\text{мТ})$: 1- $0,3 \cdot 10^{-5}$, 2- $0,5 \cdot 10^{-5}$, 3- $1,0 \cdot 10^{-5}$, 4- $2,0 \cdot 10^{-5}$, 5- $5,0 \cdot 10^{-5}$.

Параграф 5.2 посвящен исследованию режима слабой локализации в квантовом интерферометре АБ, сформированном вокруг микродефекта. Экспериментально был обнаружен эффект ОМС при исследованиях квантованной проводимости, проявляемой кольцом АБ в режиме слабой локализации носителей на микродефекте, который также определяет механизм спиновой интерференции в качестве квантового транспорта

одиноким дырок в квазиодномерных каналах КНС структуры. При исследовании поведения магнетосопротивления было обнаружено положительное/отрицательное преобразование магнетосопротивления в слабых магнитных полях с использованием метода электрической регистрации ЯМР, выявляющее влияние сверхтонкого взаимодействия между ядрами ^{29}Si и дырками внутри кольца АБ на процессы антилокализации.

В **Параграфе 5.3** рассматривается влияние оптической поляризации ядер на квантовую интерференцию в квазиодномерных каналах на поверхности КНС. В нем представлены результаты экспериментальной проверки является ли эффект рассогласования периода осцилляций АБ (Рисунок 14d) результатом сдвига Оверхаузера, а именно - применение метода оптической поляризации ядерных моментов (ОПЯ) с помощью оптической накачки с целью осуществления неравновесной поляризации электронов в объеме кремния. В результате проведенных экспериментов было показано, что оптическая ядерная поляризация моментов ^{29}Si , индуцированная циркулярно поляризованным светом, определяет характеристики кремниевых интерферометров АБ со встроенным КТК. Применение методики ОПЯ позволило однозначно установить причину дополнительного фазового сдвига $\pi/2$ в слабых магнитных полях при значениях V_{xy} вблизи $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенности КЛП, а именно, возникновение эффекта Оверхаузера.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые сформулированы следующим образом:

1. Показано, что управление потоками точечных дефектов (вакансий и собственных междоузельных атомов) в технологических процессах сухого термического окисления и последующей низкотемпературной (900°C) диффузии бора позволяет реализовать условия паритета механизмов примесной диффузии, что, в свою очередь, обеспечивает формирование

кремниевой наносандвич - структуры (КНС). Основным элементом КНС является одиночная сверхузкая (2 нм) кремниевая квантовая яма с проводимостью р-типа, сформированная на поверхности монокристаллического кремния п-типа.

2. Обнаружены спектры классического циклотронного резонанса (ЦР), оптического детектирования (ОДЦР) и электрического детектирования (ЭДЦР). Изучение угловых зависимостей ЦР позволило обнаружить идентичность между тензорами эффективной массы носителей обоих типов в КНС и в монокристаллическом кремнии. Обнаруженное гашение амплитуды и сдвиг линий ЦР демонстрируют 180° -ную симметрию при ориентации магнитного поля относительно плоскости диффузионного профиля, тем самым проявляя характеристики сверхузкой (2 нм) кремниевой квантовой ямы р-типа, образованной на поверхности монокристаллического кремния п-типа.

Обнаруженные спектры ЦР состоят из необычно узких линий, что свидетельствует о значительном увеличении времени спин-решеточной релаксации неравновесных электронов и дырок в кремниевых КЯ в сравнении с аналогичными данными для объемных монокристаллов Si, что является следствием наличия оболочек, ограничивающих КЯ и, в особенности, ее краевые каналы (КК), состоящие из цепочек примесных центров с отрицательной корреляционной энергией (negative-U).

ОДЦР регистрировался по усилению фотолюминесценции при значениях энергии, соответствующих известным D1 и D2 линиям дислокационной люминесценции, которые соответствуют позициям энергетических уровней, реконструированных negative-U центров.

ЭДЦР регистрировался по изменению магнетосопротивления КНС при протекании стабилизированного тока в плоскости КЯ. Обнаруженное различие в значениях времени релаксации момента, полученных в процессе регистрации ЭДЦР и классического ЦР, указывают на возможность участия КК в механизме ЭДЦР.

Наблюдение спектров ЦР с чрезвычайно узкими линиями с помощью разных методик свидетельствует об эффективном подавлении электрон-электронного взаимодействия (ЭЭВ) вследствие наличия оболочек, состоящих из примесных центров с отрицательной корреляционной энергией.

3. Обнаружено диамагнитное поведение магнитной восприимчивости исследуемых КНС (особенно в области слабых полей и низких температур), зарегистрированное при исследовании ее полевых и температурных зависимостей, что свидетельствует о диамагнетизме negative-U оболочек, ограничивающих КЯ и, в особенности, ее КК.

С помощью ЭПР обнаружен парамагнитный центр, обладающий C_{3v} симметрией, который представляет собой возбужденное триплетное состояние negative-U дипольного центра ($B^+ - B^-$) бора.

4. Исследования зависимостей проводимости КНС от амплитуды внешнего магнитного поля, ориентированного относительно плоскости КЯ, позволило обнаружить гальваномагнитный эффект, который возникает вследствие электромагнитной индукции Фарадея в условиях захвата одиночных квантов магнитного потока в КК.

5. Реализация спиновой интерференции в топологической структуре КЯ со встроенным р-п переходом позволила обнаружить и исследовать ЭПР, ЭДЭПР и ОДМР одиночных точечных центров в краевых каналах кремниевой квантовой ямы при высоких температурах вплоть до комнатной без применения внешних СВЧ - элементов (источник, приемник и резонатор), что стало возможным благодаря эффективному подавлению ЭЭВ.

ЭДЭПР регистрировался путем измерения проводимости/магнетосопротивления, а ОДМР путем анализа характеристик фото- и электролюминесценции.

В процессе исследований были обнаружены спектры ЭДЭПР тригонального центра, содержащего эрбий, а также центров железа и

фосфора. Кроме того, предлагаемая методика позволила обнаружить ЭДЭПР - спектр термодонора NL8, содержащего водород.

В основе предлагаемой ЭДЭПР - методики лежит измерение изменения магнетосопротивления, возникающего благодаря установлению режима слабой локализации в КК кремниевой КЯ, в условиях квантового транспорта (спиновой интерференции). При этом в условиях насыщения МР положительный отклик магнетосопротивления возникает из-за резкого уменьшения, $\tau_s, \tau_\phi > \tau_s > \tau_m$, а вне условий насыщения МР – $\tau_s > \tau_\phi > \tau_m$; где τ_s – время спин-решеточной релаксации, τ_ϕ – время фазовой релаксации, τ_m – время релаксации момента.

Показано, что чувствительность данной методики ЭДЭПР позволяет регистрировать магнитный резонанс (МР) одиночных центров, поскольку режим спиновой интерференции позволяет выявлять фазовые изменения в краевых каналах КНС.

В кремниевой КЯ КНС обнаружены спектры ОДМР углерод-водородного акцепторного центра и центра $Fe_i^+ - B_s^-$, возникающего из-за наличия остаточного содержания железа. Кроме того, в КНС структурах, легированных эрбием, с помощью предлагаемой методики ОДМР при комнатной температуре обнаружена тонкая Er^{3+} мультиплетная структура, с числом линий, соответствующим тригональной симметрии центра эрбия, а также его сверхтонкая структура ($J=7/2$).

6. Обнаружено, что в условиях спиновой интерференции в краевых каналах кремниевой квантовой ямы реализуется квантовая лестница проводимости (КЛП) при температуре 77 К. Показано, что КЛП возникает благодаря электромагнитной индукции Фарадея в зависимости от напряжения на поперечном затворе (V_{xy}) и демонстрирует наличие особенности $0,7 \cdot (2e^2/h)$. Аналогичный эффект в тех же условиях получен при варьировании двумерной концентрацией носителей в краевом канале КНС с помощью изменения напряжения на вертикальном затворе.

Показано, что наличие особенности $0,7 \cdot (2e^2/h)$ в КЛП краевых каналов КНС обусловлено взаимосвязанностью спонтанной спиновой поляризацией носителей и спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) Бычкова – Рашбы.

7. Идентифицированы осцилляции Ааронова-Кашера в экспериментальных исследованиях зависимостей проводимости краевых каналов КНС от величины напряжения на вертикальном затворе V_g .

Анализ осцилляций Ааронова-Кашера позволил определить значения эффективной массы дырок m_{eff} в зависимости от величины их двумерной плотности p_{2D} . Рассчитанные значения m_{eff} совпадают по порядку величин с данными, полученными в результате исследований ЦР.

Продемонстрировано, что осцилляции Ааронова-Кашера продольной проводимости краевых каналов кремниевой квантовой ямы в зависимости от напряжения вертикального затвора, управляющего величиной спин – орбитального взаимодействия, позволяют выявить эффект полевого спинового транзистора.

8. Обнаружен дополнительный фазовый сдвиг осцилляций Ааронова-Бома (АБ) в области $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенности КЛП. Причем отклонение периода осцилляций АБ от ожидаемого значения, равного π , составляет $\pi/2$. В свою очередь, ожидаемое значение фазового сдвига, возникающего при прохождении носителей через квантовый точечный контакт (КТК), встроенный в плечо интерферометра АБ на основе КНС, демонстрирует значение равное π вблизи начала плато баллистической проводимости.

Показано, что этот эффект возникает в результате сверхтонкого взаимодействия одиночных дырок в краевом канале КНС (которые туннелируют через КТК, встроенный в краевой канал КНС), с ядерными моментами ^{29}Si , которое индуцирует эффект Оверхаузера, что приводит к дополнительному фазовому сдвигу в характеристиках интерферометра АБ. ФСП КК кремниевой КЯ КНС определяется значением степени спиновой поляризации 2D – дырок и имеет тенденцию к увеличению от $\pi/2$ до π в

условиях увеличения амплитуды внешнего магнитного поля ($B \perp$ поверхности интерферометра АБ) и/или напряжения на поперечном затворе вследствие подавления ЭЭВ.

Обнаружено, что воздействие на образец частотой ЯМР-насыщения ядер ^{29}Si приводит к подавлению спиновой поляризации ядерных моментов, а, соответственно, и к подавлению воздействующего на дырку поля Оверхаузера и дополнительного фазового сдвига, равного $\pi/2$, что однозначно объясняет возникновение последнего за счет спиновой поляризации носителей. Полученные результаты, хорошо согласующиеся с ЯМР-исследованиями оптической ядерной поляризации в объемном кремнии, являются прямым подтверждением спиновой поляризации в квазиодномерных каналах КНС.

Обнаружен эффект отрицательного магнетосопротивления (ОМС) в исследованиях квантованной проводимости, проявляемой кольцом АБ в режиме слабой локализации, который также определяет механизм спиновой интерференции в качестве квантового транспорта одиночных дырок в квазиодномерных каналах КНС.

Выявлено влияние сверхтонкого взаимодействия между дырками в интерферометре АБ и ядрами ^{29}Si на процессы антилокализации в слабых магнитных полях при положительном/отрицательном преобразовании (ПМС \Rightarrow ОМС) магнетосопротивления в условиях применения метода электрической регистрации ЯМР.

Влияние сверхтонкого взаимодействия между дырками в интерферометре АБ и ядрами ^{29}Si на процессы антилокализации было экспериментально продемонстрировано в слабых магнитных полях благодаря переходу ПМС \Rightarrow ОМС с применением метода электрической регистрации ЯМР.

Показано, что оптическая ядерная поляризация моментов ^{29}Si , индуцированная циркулярно поляризованным светом, определяет характеристики кремниевых интерферометров АБ со встроенным КТК.

Данная методика оптической поляризации ядер позволяет установить причину дополнительного фазового сдвига $\pi/2$ в слабых магнитных полях при значениях V_{xy} вблизи $0,7 \cdot (2e^2/h)$ особенности КЛП, который обусловлен возникновением эффекта Оверхаузера.

9. Экспериментальное обнаружение КТК при высоких температурах свидетельствует об эффективном подавлении электрон-электронного взаимодействия в КК в плоскости одиночной продольной КЯ в КНС. Показано, что в КЯ КНС реализуется режим топологического диэлектрика с проводящими парными краевыми каналами, одиночные носители в которых сильно поляризованы и имеют противоположную ориентацию спинов.

10. Показано, что negative-U свойства могут проявлять не только сами оболочки краевых каналов КНС, но и свободные носители заряда, движущиеся вдоль краевых каналов. Флуктуации в распределении дипольных центров, могут вызывать формирование квантовой negative-U точки, которая является перспективным объектом для создания систем однодырочной памяти.

11. Представленные в настоящей работе исследования формируют направление по созданию полупроводниковых приборов на макроскопических квантовых эффектах в условиях подавления ЭЭВ, что делает возможным решение целого ряда задач спинтроники.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Quantum-Well Boron and Phosphorus Diffusion Profiles in Silicon / N. Bagraev, W. Gehlhoff, L. Klyachkin, A. Naeser [et al.] // Def. Dif. Forum. – 1997. - V. 143-147. - P. 1003-1008.

2. Bagraev N.T. Cyclotron Resonance in Heavily Doped Silicon Quantum Wells / N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin // Sol. St. Phenom. – 1995. - V. 47-48. - P. 589-594.

3. Gehlhoff W. Shallow and deep centres in heavily doped silicon quantum wells / W. Gehlhoff, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin // Mater. Sci.Forum. – 1995. -

V. 196-201. - P. 467-472.

4. Shallow Centers in Heavily Doped Silicon Quantum Wells / W. Gehlhoff, K. Irmischer, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin [et al.] // in Shallow Level Centres in Semiconductors. Ed. C.A.J. Ammerlaan, B. Pajot, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore. - 1997. - P. 227-232.

5. Cyclotron resonance and crystallographically- oriented quantized conductance in diffusion silicon quantum wells / W. Gehlhoff, K. Irmischer, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin [et al.] // Abs. Int. Symp. "Nanostructure-96: Physics and Technology." St.-Petersburg. – 1996. - P. 416-419.

6. Электрическое детектирование циклотронного резонанса дырок в кремниевых наноструктурах / Н.Т. Баграев, Д.С. Гец, Э.Ю. Даниловский, Л.Е. Клячкин [и др.] // ФТП. – 2013. - Т. 47. - № 4. - С. 503-509.

7. Оптически-детектируемый циклотронный резонанс в сильно легированных бором кремниевых наноструктурах на поверхности кремния (100) / Н.Т. Баграев, Р.В. Кузьмин, А.С. Гурин, Л.Е. Клячкин [и др.] // ФТП. – 2014. - Т. 48. - № 12. - С. 1646-1653.

8. Self-assembled impurity superlattices and microcavities in silicon / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Def. Dif. Forum. – 2001. - V. 194–199. P. 673-678.

9. Negative-U properties for a quantum dot / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko [et al.] // Physica B. – 2003. - V. 340-342 - P. 1061-1064.

10. Fractal self-assembled nanostructures on monocrystalline silicon surface / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Def. Dif. Forum. - 2004. – V. 337-240. – С. 1049–1054.

11. Negative-U centers as a basis of topological edge channels / N. Bagraev, E. Danilovskii, W. Gehlhoff, L. Klyachkin [et al.] // AIP Conf. Proc. – 2014. – V. 1583. - P. 238-242.

12. High Temperature Quantum Kinetic Effects in Silicon Nanosandwiches / N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, V.S. Khromov, A.M. Malyarenko [et al.] //

Semiconductors. – 2018. - V. 52. - № 4. - P. 478-484.

13. Klyachkin L.E. Macroscopic quantum effects of electromagnetic induction in silicon nanostructures / L.E. Klyachkin, N.T. Bagraev, A.M. Malyarenko // Mater. Phys. Mech. – 2022. - V. 50. - № 2. - P. 252-265.

14. Optical and magnetic properties for erbium related centres in self-assembly silicon nanostructures / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Physica B. – 1999. - V. 273-274. - P. 967-970.

15. Light emission from erbium doped nanostructures embedded in silicon microcavities / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Physica B. – 2002. - V. 308-310. - P. 365-368.

16. Bagraev N.T. Single impurity centres embedded in self-assembled silicon microcavities / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko // Physica B. – 2002. - V. 308-310. - P. 1104-1107.

17. Light emission from erbium-doped nanostructures embedded in silicon microcavities / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Physica E. – 2002. - V. 13. - P. 1059-1063.

18. Erbium-related centres embedded in silicon microcavities / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Physica B. – 2003. - V. 340-342. – P. 1074-1077.

19. Electron-dipole resonance of impurity centres embedded in silicon microcavities / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Physica B. – 2003. - V. 340-342. - P. 1078-1081.

20. Electron-dipole resonance of impurity centres embedded in silicon microcavities / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // phys. stat. sol. (c). – 2005. - V. 2. - № 2. - P. 783-786.

21. ODMR of impurity centers embedded in silicon microcavities / N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko [et al.] // Physica E. – 2008. - V. 40. - P. 1627-1629.

22. Bagraev N.T. Magnetic resonance spectroscopy of single centers in silicon quantum wells / N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev, A.M.

Malyarenko // Physica B. – 2009. - V. 404. - P. 5144-5147.

23. EDEPR of impurity centres embedded in silicon microcavities / N.T. Bagraev, D.S. Gets, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev [et al.] // Physica B. – 2009. - V. 404. - P. 5140-5143.

24. EDESR and ODMR of Impurity Centers in Nanostructures Inserted in Silicon Microcavities / N.T. Bagraev, V.A. Mashkov, E.Yu. Danilovsky, W. Gehlhoff [et al.] // Appl. Magn. Reson. – 2010. – V. 39. – № 1-2. - P. 113-135.

25. EDESR and ODMR of impurity centers in nanostructures inserted in silicon microcavities / N.T. Bagraev, V.A. Mashkov, E.Yu. Danilovsky, W. Gehlhoff [et al.] // J. of Mod. Phys. – 2011. - V. 2. - № 6. - P. 544-558.

26. ODMR of single point defects in silicon nanostructures / N.T. Bagraev, E.Yu. Danilovsky, D.S. Gets, L.E. Klyachkin [et al.] // phys. stat. sol. (c). – 2012. - V. 9. - № 5. - P. 1236-1241.

27. EDESR of impurity centers in nanostructures inserted in silicon microcavities / N.T. Bagraev, E.Yu. Danilovsky, W. Gehlhoff, D.S. Gets [et al.] // phys. stat. sol. (c). – 2012. - V. 9. - № 5. - P. 1242-1246.

28. Electrically-detected ESR in silicon nanostructures inserted in microcavities / N.T. Bagraev, E.Yu. Danilovsky, W. Gehlhoff, D.S. Gets [et al.] // AIP Conf. Proc. – 2014. - V. 1583. - P. 259-262.

29. Bagraev N.T. High temperature single-hole transport in silicon quantum wires / N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, W. Gehlhoff // Proc. of the 23rd Int.Conf. on the Phys. of Semicond. Ed. M. Scheffler, R. Zimmermann, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore – 1996. - P. 1241-1244.

30. Bagraev N.T. High temperature single-hole silicon transistors / N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, W. Gehlhoff // Superlat. and Microstr. – 1998. - V. 23. - № 6. - P. 1333-1338.

31. Spin-Dependent Processes in Self-Assembly Impurity Quantum Wires / N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko [et al.] // Mater. Sci. Forum. – 1997. - V. 258-263. - P. 1683-1688.

32. Шелых И.А. Спонтанная спиновая поляризация электронов в

квантовых проволоках / И.А. Шелых, Н.Т. Баграев, В.К. Иванов, Л.Е. Клячкин // ФТП. - 2002. - Т. 36. - № 1. - С. 70-78.

33. Шелых И.А. Спиновая деполяризация и переход металл–диэлектрик в двумерной системе в нулевом магнитном поле / И.А. Шелых, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин // ФТТ. – 2003. - Т. 45. - № 11. - С. 2085-2089.

34. Шелых И.А. Спиновая деполяризация в спонтанно поляризованных низкоразмерных системах / И.А. Шелых, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин // ФТП. – 2003. - Т. 37. - № 12. - С. 1438-1448.

35. Bagraev, N.T. Spin depolarization in quantum wires polarized spontaneously in a zero magnetic field / N.T. Bagraev, , V.K. Ivanov, , L.E. Klyachkin, , I.A. Shelykh // Phys. Rev. B. - 2004. – V. 70. – P. 155315-9.

36. Bagraev, N.T. Quantum Conductance Staircase of Edge Hole Channels in Silicon Quantum Wells / N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev, A.M. Malyarenko // J. of Mod. Phys. – 2012. - V. 3. - № 11. - P. 1771-1775.

37. Баграев Н.Т. Квантовая лестница дырочной проводимости в кремниевых наносандвичах / Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.С. Хромов // Изв. ВУЗов. Материалы электрон. техники. – 2017. - Т. 20. - № 2. - С. 97-114.

38. Spin-dependent single-hole tunneling in self-assembled silicon quantum rings / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, V.K. Ivanov [et al.] // Physica E. – 2002. - V. 12. - № 1-4. - P.762-765.

39. Spin-dependent single-hole tunneling in self-assembled silicon quantum rings / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, V.K. Ivanov [et al.] // Physica E. – 2002. - V. 13. - № 2-4. - P. 765-768.

40. Phase response of spin-dependent single-hole tunneling in silicon one-dimensional rings / N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Inst. of Phys, Conf. series. – 2002. - № 171. – Q 4.4.

41. Shelykh I.A. Interplay of h/e and $h/2e$ oscillations in gate-controlled Aharonov-Bohm rings / I.A. Shelykh, N.T. Bagraev, N.G. Galkin, L.E. Klyachkin [et al.] // Phys. Rev. B. – 2005. - V. 71. - № 11. - P. 113311-4.

42. Spin interference in silicon one-dimensional rings / N.T. Bagraev, N.G. Galkin, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2006. - V. 18. - P. L567-L573.

43. Spin interference in silicon one-dimensional rings / N.T. Bagraev, N.G. Galkin, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Physica B. – 2006. - V. 378-380. - P. 894-895.

44. Spin Interference In Silicon One-Dimensional Rings / N.T. Bagraev, N.G. Galkin, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // AIP Conf. Proc. – 2007. - V. 893. - P. 693-694.

45. Shelykh I.A. The conductance of the quantum wire touching the gated Aharonov-Bohm ring / I.A. Shelykh, N.T. Bagraev, N.G. Galkin, L.E. Klyachkin // AIP Conf. Proc. – 2007. - V. 893. - P. 1283-1284.

46. Spin interference in silicon one-dimensional rings / N.T. Bagraev, N.G. Galkin, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // J. of Phys.: Conf. Series. – 2007. - V. 61. - P. 56-60.

47. Spin interference in silicon one-dimensional rings / N.T. Bagraev, N.G. Galkin, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // Physica E. – 2008. - V. 40. - № 5. - P. 1338-1340.

48. Phase and amplitude response of the '0.7 feature' caused by holes in silicon one-dimensional wires and rings/ N.T. Bagraev, N.G. Galkin, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2008. – V. 20. - № 16. – P. 164202- 10.

Список цитируемой литературы

1. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov [et al.] // Science. –2004. – Vol. 306. – № 5696. – P. 666-669.
2. Управление состояниями в сверхпроводниковых квантовых процессорах/ В.А. Вожаков, М.В. Бастрасова, Н.В. Кленов[и др.] // УФН. – 2022. – Т. 192. - № 5. – С. 457-476.

3. Fu, L. Topological Insulators in Three Dimensions / L. Fu, C.L. Kane, E.J. Mele // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 98 – № 10. – P. 106803.
4. Hasan, M.Z. Colloquium: Topological insulators / M.Z. Hasan, C.L. Kane // *Rev. Mod. Phys.* – 2010. – Vol. 82.– № 4. – P.3045-3068.
5. Buttiker, M. Absence of back scattering in the quantum Hall effect in multiprobe conductors / M. Buttiker // *Phys.Rev. B* – 1988. –V. 38. – № 14. – P. 9375-9389.
6. Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells / M. König, S. Wiedmann, C. Brüne [et al.] // *Science.* – 2007. – Vol. 318. – № 5851. – P.766 - 770.
7. Zyuzin, A.A. RKKY interaction on surfaces of topological insulators with superconducting proximity effect / A.A. Zyuzin, D. Loss // *Phys. Rev. B* – 2014. – V. 90. – № 12. – P.125443.
8. Anderson, P.W. Model for the Electronic Structure of Amorphous Semiconductors / P.W. Anderson // *Phys. Rev. Lett.* – 1975. – Vol. 34. – № 15. – P. 953-955.
9. Драбкин, И.А. Спонтанная диссоциация нейтральных состояний примесей на положительно и отрицательно заряженные состояния / И.А. Драбкин, Б.Я. Мойжес // *ФТП* – 1981. – Т. 15. - № 4. – С. 625-648.
10. Bagraev, N.T. Tunneling negative-U centers and photo-induced reactions in solids / N.T. Bagraev, V.A. Mashkov // *Solid St. Commun.* – 1984. – Vol. 51. – № 7. – P. 515-520.
11. Bekman, H.H.P.Th. Si-NL10: Paramagnetic Acceptor State of the Silicon Thermal Donor / H.H.P.Th. Bekman, T. Gregorkiewicz, C.A.J. Ammerlaan // *Phys. Rev. Lett.*, – 1988. – Vol. 61. – № 2. – P. 227-230.
12. Mukashev, B.N. Metastable and bistable defects in silicon / B.N. Mukashev, Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelkinskii // *Physics-USpekhi*, – 2000. – Vol. 43. – № 2. – P. 139–150.
13. Инверсная населенность уровней энергии ионов эрбия при передаче возбуждения от полупроводниковой матрицы в структурах на основе

- кремния/германия / М.В. Степихова, Д.М. Жигунов, В.Г. Шенгуров [и др.] // Письма в ЖЭТФ, – 2005. – Т. 81. – № 10. – С. 614–617.
14. Carey, J.D. Electron paramagnetic resonance and photoluminescence study of Er-impurity complexes in Si / J.D. Carey, R.C. Barklie, J.F. Donegan // Phys. Rev. B, – 1999. – Vol. 59. – № 4. – P. 2773-2782.
15. Possible Spin Polarization in a One-Dimensional Electron Gas / K.J. Thomas, J.T. Nicholls, M.Y. Simmons [et al.] // Phys. Rev. Lett., – 1996. – Vol. 77. – № 1. – P. 135-138.
16. Sadreev A.F., Signatures of quantum chaos in complex wave functions describing open billiards / A.F. Sadreev, K.-F. Berggeren // J. Phys. A: Math. Gen., - 2005. - V. 38. – P. 10787 – 10804.
17. Gate-Controlled Spin-Orbit Quantum Interference Effects in Lateral Transport / J.B. Miller, D.M. Zumbuehl, C.M. Marcus [et al.] // Phys. Rev. Lett., – 2003. – V. 90. – № 7. – P. 076807.
18. Квантовые осцилляции магнетосопротивления в гетероструктурах HgCdTe/HgTe/HgCdTe с инвертированным зонным спектром / А.С. Боголюбский, С.В. Гудина, В.Н. Неверов [и др.] // ФТТ, - 2021. – Т. 63. - № 12. – С. 1983-1993.
19. Phase measurement in a quantum dot via a double-slit interference experiment / R. Schuster, E. Buks, M. Heiblum [et al.] // Nature, – 1997. – V. 385. – № 6615. – P. 417-420.
20. Баграев Н.Т. Наблюдение магнитного резонанса ядер ^{29}Si в кремнии в слабых магнитных полях / Н.Т. Баграев, Л.С. Власенко, Р.А. Житников // Письма в ЖТФ, – 1978. – Т. 4. – № 5 – P. 1033-1036.