

На правах рукописи



ГЕЦ ДМИТРИЙ СТАНИСЛАВОВИЧ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ДЕТЕКТИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ
ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС ТОЧЕЧНЫХ ЦЕНТРОВ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ**

специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

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

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Вывенко Олег Федорович
Санкт-Петербургский государственный университет

Доктор физико-математических наук, профессор
Гасумянц Виталий Эдуардович
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

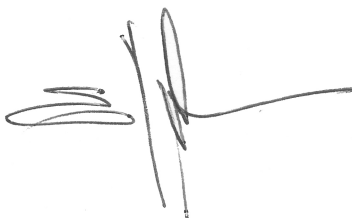
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Защита состоится «20» марта 2013 г. в 17ч. 30мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ГУК, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » февраля 2013 г.

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



Ермакова Н.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Электрическое детектирование электронного парамагнитного резонанса (ЭДЭПР) является хорошо известным методом идентификации точечных и протяженных дефектов в полупроводниковых объемных, низкоразмерных и приборных структурах [1-7]. Методики ЭДЭПР основаны на использовании внешних резонаторов и источников СВЧ излучения в условиях сканирования магнитного поля. Однако в этом случае индуцированные переходы между зеемановскими подуровнями носителей исследуемого центра регистрируются не по поглощению СВЧ мощности, как в рамках классического ЭПР, а по резонансному изменению тока, протекающего через образец, или магнетосопротивления [1-3,5]. Причем различные версии ЭДЭПР предусматривали наличие оптической накачки или инжекции носителей, что сделало возможным изучение не только примесных и структурных дефектов со спином $S=1/2$, но и их возбужденных высокоспиновых состояний, $S \geq 1$, возникающих вследствие селективного заполнения магнитных подуровней [4,6,7]. Вместе с тем, неравновесные условия регистрации ЭДЭПР не позволили однозначно определить его механизм, поскольку резонансное изменение тока или магнетосопротивления фотовозбужденных носителей может быть обусловлено влиянием спинозависимой рекомбинации и спинозависимого рассеяния соответственно на величину их плотности и подвижности [1,2,4,6,7].

Важным шагом в разрешении данной проблемы явилось наблюдение ЭДЭПР DX-центров в процессе регистрации квантового эффекта Холла в гетеропереходе $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, которое проводилось в условиях стабилизированного тока исток-сток, хотя и в этом случае использовалась предварительная оптическая накачка [8,9]. Эти результаты представляют собой практически первую регистрацию ЭДЭПР точечных центров в краевых каналах с высокой спиновой поляризацией носителей, возникающих в низкоразмерных полупроводниковых структурах в условиях сильного магнитного поля. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность реализации ЭДЭПР точечных центров в условиях спинозависимого транспорта носителей в краевых каналах топологических изоляторов и сверхпроводников, которые существуют в отсутствие внешнего магнитного поля [10,11]. Кроме того, эти исследования представляют значительный интерес, поскольку сверхпроводящие низкоразмерные топологические структуры могут быть источниками джозефсоновской генерации, которая может быть усилена в присутствии встроенных микрорезонаторов. Таким образом, появляется возможность регистрации ЭДЭПР в низкоразмерных структурах путем измерения магнетосопротивления в отсутствие внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ излучения. Вышесказанное определяет актуальность темы данной диссертационной работы.

Цель работы заключалась в исследовании процессов спинозависимого транспорта носителей тока в сверхузких полупроводниковых квантовых ямах, ограниченных

сверхпроводящими δ -барьерами, для регистрации электрического детектирования ЭПР точечных центров и циклотронного резонанса по измерению полевых зависимостей магнетосопротивления в отсутствие внешнего источника и приемника СВЧ излучения, а также – внешнего резонатора.

В задачи работы входило изучение следующих вопросов:

1. Обнаружение и исследование осцилляций Шубникова – де Гааза в слабых магнитных полях в сверхузких кремниевых квантовых ямах (СККЯ) p -типа, ограниченных сильнолегированными бором δ -барьерами, на поверхности n -Si (100).
2. Изучение характеристик осцилляций Шубникова – де Гааза в СККЯ p -типа на поверхности n -Si (100) в условиях изменения плотности двумерных дырок в зависимости от величины внешнего магнитного поля вследствие сверхпроводящих свойств δ -барьеров, сильнолегированных бором.
3. Исследование полевых зависимостей продольного магнетосопротивления квантовых ям p -типа со встроенными микрорезонаторами, ограниченных сильнолегированными бором сверхпроводящими δ -барьерами, на поверхности n -Si (100) и n -6H-SiC.
4. Идентификация спектров электрически детектируемого ЭПР (ЭДЭПР) точечных центров в СККЯ p -типа, ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами, на основании результатов измерений полевых зависимостей магнетосопротивления в отсутствие внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ излучения, а также – исследований процессов джозефсоновской генерации.
5. Обнаружение спектров ЭДЭПР NV-дефекта и V_{Si} , формирующихся в условиях получения планарной структуры, представляющей собой сверхузкую квантовую яму p -типа на поверхности n -6H-SiC, без предварительного радиационного облучения.
6. Обнаружение и исследование электрически детектируемого циклотронного резонанса (ЭЦР) двумерных дырок в СККЯ p -типа на поверхности n -Si (100) по измерению резонансного отклика магнетосопротивления вследствие влияния краевых каналов на процессы спинозависимого транспорта и локализации носителей.

Научная новизна работы

1. Наличие микрорезонаторов, встроенных в плоскость сверхузкой кремниевой квантовой ямы (СККЯ), ограниченной сверхпроводящими сильнолегированными бором δ -барьерами, являющимися источником джозефсоновской генерации, позволили впервые зарегистрировать спектры электрически детектируемого ЭПР (ЭДЭПР) точечных центров посредством измерения магнетосопротивления в отсутствие внешнего источника и приемника СВЧ излучения.

- Исследования ЭДЭПР и ЭПР показали, что NV-дефект и изолированная кремниевая вакансия (V_{Si}) формируются в сверхузкой квантовой яме p -типа, ограниченной сильнолегированными бором δ -барьерами, непосредственно в процессе ее получения на поверхности кристалла n -6H-SiC без последующего радиационного облучения.
- Регистрация электрически детектируемого циклотронного резонанса (ЭДЦР) путем измерения продольного магнетосопротивления в отсутствие внешнего резонатора, а также – источника и приемника СВЧ излучения, позволила определить малые значения эффективной массы легкой и тяжелой дырок в различных двумерных подзонах СККЯ p -типа благодаря наличию встроенных микрорезонаторов и джозефсоновской генерации ограничивающих её сильнолегированных бором δ -барьеров.
- Впервые эффект Шубникова – де Гааза был зарегистрирован в слабых магнитных полях вследствие малой эффективной массы и большого времени релаксации момента двумерных дырок в СККЯ p -типа, ограниченных сильнолегированными бором δ -барьерами.

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 спинозависимого транспорта носителей тока в низкоразмерных полупроводниковых структурах.

Научная и практическая значимость диссертационного исследования определяется результатами регистрации спектров ЭДЭПР точечных центров в полупроводниковых квантовых ямах, ограниченных сверхпроводящими сильнолегированными бором δ -барьерами, а также – ЭДЦР носителей тока путем измерения магнетосопротивления без использования внешнего резонатора, внешнего источника и приёмника СВЧ излучения. Полученные результаты свидетельствуют, что методика измерения ЭДЭПР и ЭДЦР позволяют идентифицировать остаточные точечные центры, а также определять малые значения эффективной массы в различных подзонах двумерных дырок в сверхузких кремниевых квантовых ямах.

Защищаемые положения:

- Осцилляции Шубникова – де Гааза в сверхузких кремниевых квантовых ямах (СККЯ) p -типа на поверхности n -Si (100), ограниченных сильнолегированными бором δ -барьерами, регистрируются в слабых магнитных полях вследствие малой эффективной массы и большого времени релаксации момента двумерных дырок.
- Электрическое детектирование ЭПР (ЭДЭПР) точечных центров в СККЯ p -типа на поверхности n -Si (100), ограниченных сильнолегированными бором δ -барьерами, реализуется по измерению магнетосопротивления в отсутствие внешнего резонатора, источника и приемника микроволнового излучения. Данная методика ЭДЭПР основана на джозефсоновской генерации СВЧ

излучения из сильнолегированных бором δ -барьеров при наличии микрорезонаторов, встроенных в плоскость СККЯ.

3. Спектры ЭДЭПР и ЭПР демонстрируют, что NV-дефект и изолированная кремниевая вакансия (V_{Si}) формируются в сверхузкой квантовой яме p -типа, ограниченной сильнолегированными бором δ -барьерами, непосредственно в процессе ее получения на поверхности кристалла $6H-SiC$ n -типа без последующего радиационного облучения.
4. Спектры электрически детектируемого циклотронного резонанса (ЭДЦР) и их угловые зависимости, полученные с помощью измерений магнетосопротивления СККЯ p -типа, ограниченной сильнолегированными бором δ -барьерами, идентифицируют малые значения эффективной массы в двумерных подзонах легкой и тяжелой дырки.

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 25-й Международной конференции по дефектам в полупроводниках (ICDS-25, St. Petersburg, Russia, 20-24 July, 2009), 10-й Международной конференции по наноструктурированным материалам (NANO-2010, Roma, Italy, September 13-17, 2010), 11-й Международной конференции по физике нелинейного взаимодействия излучения с наноструктурами (PLMCN-11, Berlin, Germany, April 4-8, 2011); 8-й Международной конференции «Кремний-2001» (Москва, Россия, Июль 5-8, 2011); 10-й Российской конференции по физике полупроводников (Нижний Новгород, Россия, Сентябрь 19-23, 2011), 31-й Международной конференции по физике полупроводников (ICPS-31, Zurich, Switzerland, July 29 - August 3, 2012), Международной конференции по нанофизике и нанотехнологиям (ICN+T 2012, Paris, France, July 23-27, 2012), 7-й Международной конференции по физике и применению спинозависимых явлений в полупроводниках (PASPS VII, Netherlands, Eindhoven, Netherlands, August 5-8, 2012).

Публикации: по результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 9 публикаций в ведущих отечественных и международных журналах. Список публикаций приведен в конце диссертации.

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

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 квантованию транспортных характеристик носителей в твердых телах, находящихся в магнитном поле, и резонансным явлениям в условиях СВЧ накачки, таким как циклотронный резонанс (ЦР) и электронной парамагнитный резонанс (ЭПР). Кроме того, в первой главе описываются критерий “сильного поля”, который определяет условия наблюдения ЦР в зависимости от величины внешнего магнитного поля и температуры, а также - рассматриваются правила отбора и сверхтонкое электронно-

ядерное взаимодействие, составляющие основу ЭПР спектроскопии точечных и протяженных дефектов в твердом теле.

В первом параграфе кратко приводится теоретическое описание квантования энергетического спектра свободных электронов в твердом теле в условиях магнитного поля, перпендикулярного направлению их движения. Рассмотрены основные транспортные характеристики образцов, являющиеся следствием квантования Ландау, проявляющиеся в виде осцилляции продольного магнетосопротивления, осцилляции Шубникова – де Гааза, и магнитной восприимчивости, осцилляции де Гааза – ван Альфена [12-14].

Во втором параграфе описан критерий “сильного поля”, выполнение которого необходимо для наблюдения осцилляций Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена, а также - циклотронного резонанса.

Третий параграф состоит из нескольких частей, в первой части описываются энергетические характеристики системы с одним неспаренным электроном и одним ядром ($I=1/2$). Вторая часть посвящена правилам отбора энергетических переходов. В третьей части рассматривается сверхтонкое взаимодействие неспаренных электронов ($S=1/2$, $S=1$) с ядрами, приводящее к сверхтонкому расщеплению зеемановских подуровней атома, которое определяет характеристики спектров ЭПР [15].

Четвертый параграф посвящен исследованиям циклотронного резонанса (ЦР) в монокристаллическом кремнии. Анализируются угловые зависимости спектров ЦР, с помощью которых идентифицируется тензор эффективной массы электронов и дырок, который составляет основу структуры зоны проводимости и валентной зоны [16].

Во второй главе представлен обзор основных свойств кремниевых сандвич-наноструктур, исследуемых в данной работе. Сандвич-наноструктура представляют собой сверхузкую кремниевую квантовую (СККЯ) яму p -типа проводимости, ограниченную сильнолегированными бором δ -барьерами, которая получена на поверхности Si (100) n -типа.

Первый параграф описывает получение сандвич-наноструктур с помощью прецизионного управления потоками вакансий и собственных междоузельных атомов, генерируемых границей раздела Si-SiO₂, что приводит к самоорганизации микродефектов на поверхности монокристаллического кремния. С помощью измерений угловых зависимостей циклотронного резонанса (ЦР), ЭПР, сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) было показано, что на начальной стадии окисления на поверхности кремния (100) формируются сандвич-наноструктуры, ограниченные двумерными слоями микродефектов, состоящих из собственных междоузельных атомов [17]. Далее, в рамках планарной диффузионной нанотехнологии проводится легирование бором из газовой фазы с целью пассивации двумерных слоев микродефектов, которые трансформируются в δ -барьеры. Проведенные исследования показали, что

сильнолегированные бором, $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, δ -барьеры представляют собой чередующуюся последовательность нелегированных микродефектов и легированных квантовых точек с размерами 2 нм [18]. Причем каждая легированная квантованная точка по данным ЭПР содержит два примесных атома бора, реконструированных в тригональный дипольный центр. В рамках предложенной модели, реконструкция мелких акцепторов бора, приводящая к образованию нейтральных дипольных центров, $2B^0 \rightarrow B^+ + B^-$, сопровождается формированием корреляционной энергетической щели в плотности состояний вырожденного двумерного дырочного газа. Угловые зависимости величины амплитуды ЦР, зарегистрированные на разных стадиях получения сэндвич-наноструктур, показывают, что СККЯ располагается в плоскости Si (100) [18].

Во втором параграфе описываются электрические и оптические свойства кремниевых сэндвич-наноструктур. Представлены спектры электролюминесценции, отражения и пропускания, а также - демонстрируется туннельная вольтамперная характеристика сэндвич-наноструктуры. Спектры электролюминесценции и туннельные вольт-амперные характеристики выявляют переходы между различными подуровнями размерного квантования тяжелой и легкой дырки. На основании этих данных предлагается зонная схема исследуемой кремниевой сэндвич-наноструктуры [18].

В третьем параграфе рассматриваются сверхпроводящие свойства сэндвич-наноструктур, обусловленные сильнолегированными бором δ -барьерами. Показана диаграмма статической магнитной восприимчивости в зависимости от температуры и магнитного поля, из которой определялась величина сверхпроводящей щели, равная $2\Delta = 0,044 \text{ эВ}$, что соответствует значению критической температуры, $T_c = 145\text{К}$, определенному из температурных и полевых зависимостей удельного сопротивления, коэффициента Зеебека и скачка теплоемкости, и подтверждается данными измерений туннельной вольт-амперной характеристики [19].

В четвертом параграфе описан джозефсоновский переход, сформированный сверхпроводящими δ -барьерами, ограничивающими СККЯ, наличие которого идентифицируется регистрацией ступенек Фиске и Шапиро, демонстрирующих генерацию в гигагерцевом диапазоне длин волн.

В пятом параграфе приводится обзор работ по спинозависимой рекомбинации и спинозависимому рассеянию носителей в полупроводниках, которые являются основой методов электрически детектируемого электронного парамагнитного резонанса (ЭДЭПР) и оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Отмечается, что в рамках различных методик ЭДЭПР и ОДМР используются внешние резонаторы и источники СВЧ в условиях сканирования магнитного поля. Однако регистрация ЭПР, в отличие от классических методик, осуществляется не по поглощению образцом СВЧ излучения, а по измерению степени поляризации люминесценции и спектров пропускания света (ОДМР) [20], а также - регистрации изменения величины магнетосопротивления или протекающего тока (ЭДЭПР) [5,6]. Причем методы ЭДЭПР и ОДМР обладают

высокой чувствительностью, но в неравновесных условиях, при оптической накачке или инжекции носителей, не позволяют разделить вклады спинозависимых рекомбинации и рассеяния на точечных и протяженных центрах в полупроводниках. Показано, что важным шагом в разрешении данной проблемы явилось наблюдение ЭДЭПР DX-центров в условиях стабилизации тока исток - сток в процессе регистрации квантового эффекта Холла, который возникает вследствие формирования краевых баллистических каналов в сильном магнитном поле. Таким образом, был идентифицирован вклад спинозависимого рассеяния на точечных центрах в механизм ЭДЭПР в полупроводниковых наноструктурах. [3,8]

В шестом параграфе описываются спиновые свойства транспорта дырок в краевых каналах кремниевой сандвич-наноструктуры.

В первой части приведены данные исследований спинозависимого транспорта носителей через кремниевую сандвич-наноструктуру в отсутствие разогрева вследствие фиксации тока исток – сток на уровне менее 10 нА, проявляющегося в кратности продольной проводимости величине $2e^2/h$ и осцилляциях Ааронова-Кашера в зависимости от величины напряжения вертикального затвора [21].

Во второй части показано, что значение продольной проводимости в энергетическом интервале сверхпроводящей щели соответствует “ $0.7(2e^2/h)$ -особенности” квантовой лестницы проводимости, что указывает на наличие спиновой поляризации дырок в краевых каналах сандвич-наноструктуры. Эти результаты были рассмотрены в рамках топологических состояний, представляющих собой сверхпроводящие краевые каналы, содержащие квантовые точечные контакты. Предложенная в работе [21] модель основана на самоупорядоченной системе одиночных тригональных дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией, сформированных внутри δ -барьеров.

В третьей части приведены данные исследований продольной и поперечной (холловской) проводимости, свидетельствующие о наблюдении квантового спинового эффекта Холла в отсутствие внешнего магнитного поля. Обнаруженное соотношение продольной, $4e^2/h$, и холловской, e^2/h , проводимости свидетельствует о наличии спиновой поляризации дырок в краевых каналах кремниевых сандвич-наноструктур.

Таким образом, спиновая поляризация дырок, возникающая в краевых каналах кремниевых сандвич-наноструктур вследствие многократного андреевского отражения и спонтанной спиновой поляризации, представляет интерес для изучения спиновой интерференции, проявляющейся в регистрации квантового спинового эффекта Холла и осцилляции продольной проводимости Ааронова-Кашера. С учетом джозефсоновской генерации СВЧ излучения из сверхпроводящих δ -барьеров со встроеными микрорезонаторами, управление характеристиками спиновой интерференции является основой для регистрации ЭДЭПР в краевых каналах полупроводниковых сандвич-наноструктур по изменению магнетосопротивления в отсутствие внешнего резонатора, СВЧ источника и

приемника. Вышесказанное определяет цель и задачи данной работы, которые сформулированы в конце второй главы.

В третьей главе приведены экспериментальные данные по обнаружению и исследованию осцилляций Шубникова – де Гааза (ШдГ) в слабом магнитном поле в кремниевой сэндвич-наноструктуре.

Первый параграф посвящен исследованиям ШдГ осцилляций в классических квантово-размерных структурах, таких как структуры металл-окисел-полупроводник. Отмечено, что для наблюдения ШдГ осцилляций необходимо выполнение критерия “сильного поля” $\omega_c \tau = V \cdot \mu \gg 1$. Кроме того, в квантово-размерных структурах спектр уровней Ландау зависит от энергетических позиций уровней размерного квантования. Показано, что исследование ШдГ осцилляций в низкоразмерных системах представляет большой интерес, поскольку с помощью измерений их периода и температурной зависимости амплитуды можно определить соответственно плотность и эффективную массу носителей.

Во втором параграфе приведены данные измерений ШдГ осцилляций в кремниевых сэндвич-наноструктурах в слабых магнитных полях при $T=77\text{K}$. Зависимости магнетосопротивления неожиданно проявили две последовательности ШдГ осцилляций с различным периодом. Из полученных значений периода ШдГ осцилляций определялась плотность двумерных дырок. Показано, что эти две последовательности ШдГ осцилляций возникают вследствие нелинейной зависимости распада куперовских пар на границе СККЯ - сверхпроводящий δ -барьер от магнитного поля, что приводит к нелинейному изменению плотности дырок в СККЯ. Поэтому могут возникать несколько интервалов значений магнитного поля, в которых реализуется критерий “сильного поля” и проявляются ШдГ осцилляции, соответствующие одному и тому же номеру уровня Ландау. Обнаружение ШдГ осцилляций в слабом магнитном поле стало возможным благодаря низкой эффективной массе двумерных дырок в СККЯ, $m^* = 2.5 \cdot 10^{-4} m_0$, где m_0 – масса свободного электрона, величина которой контролировалась посредством измерения температурных измерений осцилляций де Гааза – ван Альфена (дГвА). Таким образом, малая величина эффективной массы двумерных дырок в сочетании с достаточно большим временем релаксации момента, 10^{-10}с , которое следует из величины полуширины пиков ШдГ осцилляций и линий циклотронного резонанса, свидетельствует о выполнении условия “сильного поля” в слабых магнитных полях при высоких температурах.

Рассмотрение структуры максимумов ШдГ осцилляций показывает наличие спинового расщепления уровней Ландау, величина которого практически не изменяется с увеличением магнитного поля, что указывает на важную роль обменного взаимодействия в его формировании. Наблюдается тонкая структура пиков ШдГ осцилляций, которая также мало меняется при изменении номера уровня Ландау. Подобная модуляция характеристик продольного транспорта носителей объясняется в рамках резонансного туннелирования дырок между

краевыми каналами СККЯ через локализованные состояния на ее границе с δ -барьерами [22].

В четвёртой главе представлены результаты по обнаружению и исследованию электрически детектируемого электронного парамагнитного резонанса (ЭДЭПР) путем измерения магнетосопротивления полупроводниковых сэндвич-наноструктур со встроенными микрорезонаторами без использования внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ излучения.

Первый параграф посвящен регистрации ЭДЭПР спектров в кремниевых сэндвич-наноструктурах, которая стала возможным благодаря СВЧ генерации в условиях джозефсоновского перехода, сформированного сверхпроводящими δ -барьерами, ограничивающими СККЯ. Частота СВЧ генерации джозефсоновского перехода, 9.3 ГГц, контролировалась посредством измерения ступенек Фиске и Шапиро. Важную роль в экспериментальной реализации данного метода ЭДЭПР играли спиновая поляризация двумерных дырок вследствие многократного андреевского отражения и наличие микрорезонатора, встроенного в плоскость СККЯ. Длина резонатора, 4.74 мм, соответствовала частоте джозефсоновской генерации, 9.3 ГГц; $L = \lambda/2n$, где коэффициент преломления, n , в кремнии равен 3.4. Измерения продольного и поперечного магнетосопротивления сэндвич-наноструктур проводились при $T=77\text{K}$ в рамках холловской геометрии в условиях стабилизированного тока исток - сток, 10 нА. Анализируются полученные ЭДЭПР спектры центров фосфора, кислородного термодонора NL8, водородсодержащего термодонора NL10 и его сверхтонкого расщепления, центров Fe^+ и FeH . Кроме того, показаны спектры ЭДЭПР этих же центров, зарегистрированных вдвое меньшем магнитном поле при активном участии второй гармоники, что практически невозможно реализовать в рамках классического ЭПР метода. Регистрация ЭДЭПР по измерению магнетосопротивления позволила впервые идентифицировать точечный центр эрбия в кремнии, тригональная симметрия которого была подтверждена также с помощью измерения угловых зависимостей методом ОДМР. Каждая линия сверхтонкой структуры центра эрбия ($I=7/2$) оказалась расщепленной еще на четыре линии, что свидетельствует о присутствии бора ($I=3/2$) в его составе. Таким образом, обнаруженный точечный центр, по-видимому, сформирован на основе тригонального дипольного центра бора в δ -барьере, путем замещения одного из его атомов эрбием.

Во втором параграфе обсуждается механизм регистрации ЭДЭПР по измерению магнетосопротивления в условиях встроенного микрорезонатора и наличии джозефсоновской генерации из δ -барьеров, ограничивающих СККЯ. Описывается спинозависимое рассеяние поляризованной дырки на точечном центре в краевом канале сэндвич-наноструктуры. Описание строится на сравнении времен фазовой релаксации, τ_ϕ , спин-решеточной релаксации, τ_s , и времени релаксации момента (транспортного времени), τ_m , вне и в условиях регистрации ЭДЭПР по измерению магнетосопротивления. Предполагается, что вне резонанса выполняется

соотношение $\tau_s > \tau_\phi > \tau_m$, тогда как вследствие индуцированных ЭПР переходов между зеемановскими подуровнями время спин-решеточной релаксации дырок резко уменьшается: $\tau_\phi > \tau_s > \tau_m$. Таким образом, возникают условия слабой локализации, которые приводят к наличию пика магнетосопротивления при значении магнитного поля, соответствующего регистрации ЭПР.

В третьем параграфе приведены результаты измерений ЭДЭПР по измерению магнетосопротивления сэндвич-наноструктур на основе карбида кремния n -6H-SiC при $T=77$ К. Данная сэндвич-наноструктура представляет собой квантовую яму p -типа проводимости, ограниченную сильнолегированными бором δ -барьерами, на поверхности n -6H-SiC. Характеристики джозефсоновской генерации контролировались путем измерений ступенек Фиске при наличии микрорезонатора, встроенного в плоскость квантовой ямы. Показаны ЭДЭПР спектры мелкого центра бора, а также - кремниевой вакансии и NV-дефекта, впервые полученные непосредственно в процессе роста сэндвич-наноструктуры на основе n -6H-SiC без использования радиационного излучения. Полученные результаты анализируются, принимая во внимание данные изучения точечных центров объема 6H-SiC методами ЭПР и фото-ЭПР [23-25].

В пятой главе приведены экспериментальные данные по регистрации электрически детектируемого циклотронного резонанса (ЭДЦР) дырок с помощью измерений магнетосопротивления кремниевых сэндвич-наноструктур со встроенными микрорезонаторами, в отсутствие внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ излучения. Частота джозефсоновской СВЧ генерации из сильнолегированных бором δ -барьеров, 9.3 ГГц, контролировалась посредством измерения ступенек Фиске и Шапиро.

В первом параграфе приводятся характеристики кремниевых сэндвич-наноструктур, полученные при измерении классического ЦР при $T=3.8$ К. Анализ узких линий ЦР легкой и тяжелой дырок свидетельствует о достаточно большом значении транспортного времени, $\tau_m = 5 \cdot 10^{-10}$ с, которое соответствует их высокой подвижности в кремниевых сэндвич-наноструктурах.

Во втором параграфе обсуждаются зарегистрированные экспериментальные зависимости ЭДЦР, что стало возможным благодаря наличию краевых каналов с высокой подвижностью двумерных дырок в кремниевых сэндвич-наноструктурах на поверхности n -Si (100). Полученные спектры ЭДЦР, а также их угловые зависимости, измеренные в слабом магнитном поле, идентифицируют малые значения эффективной массы легкой и тяжелой дырок в различных двумерных подзонах СККЯ. На основании ширины линий ЭДЦР двумерных дырок была проведена оценка значения транспортного времени, $2.5 \cdot 10^{-10}$ с, которое находится в хорошем согласии с результатами, полученными при измерении классического ЦР, что указывает на возможность участия краевых каналов с высокой подвижностью носителей в механизме ЭДЦР. Причем условия наблюдения ЭДЦР возникают каждый раз при полном заполнении уровня Ландау, ближайшего к уровню Ферми,

что соответствует режиму слабой локализации и приводит к наличию пика магнетосопротивления. Принимая во внимания полученные значения транспортного времени, были оценены длина свободного пробега, длина фазовой релаксации и значение плотности, соответствующие различным подзонам тяжелой и легкой дырки.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Осцилляции Шубникова - де Гааза (ШдГ) были обнаружены при высоких температурах в слабых магнитных полях с помощью измерений продольного магнетосопротивления сверхузкой кремниевой квантовой ямы (СККЯ) p -типа на поверхности кремния (100) n -типа, которая ограничена сильнолегированными бором δ -барьерами, проявляющими сверхпроводящие свойства.
2. Показано, что квантование характеристик продольного транспорта двумерных дырок в СККЯ реализуется благодаря их малой эффективной массе и большому времени релаксации момента. Значение плотности двумерных дырок, определенное из частоты осцилляций ШдГ, увеличивается с ростом магнитного поля вследствие разрушения куперовских пар дырок на границе СККЯ - сверхпроводящий δ -барьер. Обнаруженные осцилляции ШдГ демонстрируют наличие спинового расщепления уровней Ландау, величина которого практически не изменяется с увеличением магнитного поля, что указывает на важную роль обменного взаимодействия в его формировании.
3. Показано, что электрическое детектирование ЭПР точечных центров в полупроводниковых квантовых ямах (ЭДЭПР), ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами, проводится непосредственно путем регистрации полевых зависимостей магнетосопротивления в условиях стабилизации тока исток-сток в отсутствии внешнего резонатора, источника и приемника СВЧ излучения.
4. Предлагаемый метод ЭДЭПР реализуется при наличии микрорезонаторов, встроенных в плоскость квантовой ямы, и джозефсоновской генерации из ограничивающих ее сверхпроводящих δ -барьеров. С помощью данного метода ЭДЭПР были идентифицированы центры фосфора, кислородные термодоноры NL8, водородсодержащие термодоноры, остаточные центры FeH и Fe⁺, а также тригональные центры эрбия в СККЯ, ограниченных δ -барьерами сильнолегированными бором.
5. Показано, что механизм ЭДЭПР основан на изменении магнетосопротивления, которое возникает вследствие режима слабой локализации в краевых каналах в полупроводниковой квантовой яме. В частности, положительный отклик магнетосопротивления является

результатом резкого уменьшения τ_s в условиях магнитного резонанса, $\tau_\phi > \tau_s > \tau_m$, тогда как вне резонанса – $\tau_s > \tau_\phi > \tau_m$; где τ_m – время релаксации момента, τ_ϕ – время фазовой релаксации, τ_s – время спин-решеточной релаксации.

6. Посредством регистрации полевых зависимостей магнетосопротивления были обнаружены спектры ЭПР NV–дефекта и V_{Si} в сверхузкой квантовой яме p -типа проводимости, ограниченной сильнолегированными бором δ -барьерами, на поверхности кристалла 6H-SiC n -типа, которые формируются непосредственно в процессе получения планарной структуры в условиях инжекции кремниевых вакансий на границе раздела $SiO_2/6H-SiC$ без последующего радиационного облучения. Данные измерения ЭДЭПР были подтверждены с помощью высокочувствительного спектрометра ЭПР (X-band), несмотря на малое число регистрируемых спинов ($\geq 10^{10}$) в исследуемой сверхузкой квантовой яме, ограниченной δ -барьерами.
7. Полевые зависимости продольного магнетосопротивления СККЯ p -типа, ограниченной сверхпроводящими сильнолегированными бором δ -барьерами на поверхности n -Si (100), которые измерялись в отсутствии внешнего источника и приёмника СВЧ излучения, а также – внешнего резонатора, демонстрируют спектры циклотронного резонанса (ЦР), соответствующие различным подуровням двумерных дырок.
8. Электрическое детектирование циклотронного резонанса (ЭДЦР) стало возможным благодаря наличию микрорезонаторов, встроенных в плоскость СККЯ, и джозефсоновской генерации из сверхпроводящих δ -барьеров. Спектры ЭДЦР и их угловые зависимости, измеренные в слабом магнитном поле, идентифицируют малые значения эффективной массы легкой и тяжелой дырок в различных двумерных подзонах СККЯ, что указывает на возможность участия краевых каналов с высокой подвижностью носителей в механизме резонансного изменения магнетосопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schmidt J. Modulation De La photoconductivite dans le magnetique electronique des impuretes peu profondes [Text] / Schmidt J. and Solomon I. // Compt. Rend. Acad. – 1966. – V.263. – P.169.
2. Honig A. Neutral-Impurity Scattering and Impurity Zeeman Spectroscopy in Semiconductors Using Highly Spin-Polarized Carriers [Text] / Honig A. // Phys. Rev. Letters. – 1966. – V.17. – P.186.
3. Lepine D. Spin-Dependent Recombination on Silicon Surface [Text] / Lepine D. // Phys. Rev. B. – 1972. – V.6. – P.436.
4. Kaplan P. Explanation of the large spin-dependent recombination effect in semiconductors [Text] / Kaplan P., Solomon I., and Mott N. E. // J. de Phys. Letters. – 1978. – V.39. – P.L51.

5. Кведер В.В. Спин-зависимая рекомбинация на дислокационных оборванных связях в кремнии [Текст] / Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Шалынин А.И. // ЖЭТФ. – 1982. – Т.83. – С.699.
6. Vlasenko L.S. Electron paramagnetic resonance versus spin-dependent recombination: Excited triplet states of structural defects in irradiated silicon [Text] / Vlasenko L.S., Martynov Yu.V., Gregorkiewicz T., and Ammerlaan S.A.J. // Phys. Rev. B. – 1995. – V.52. – P.1144.
7. Баграев Н.Т. Спин-зависимая рекомбинация в полупроводниках [Текст] / Баграев Н.Т., Машков В.А. // Известия АН СССР, сер. Физическая. – 1988. – Т.52. – С.471.
8. Dobers M. ESR in the two-dimensional electron gas of GaAs-Al_xGa_{1-x}As heterostructures [Text] / Dobers M., von Klitzing K., and Weimann G. // Phys. Rev. B. – 1988. – V.38. – P.5453.
9. Nefyodov Yu.A. g-factor anisotropy in a GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well probed by electron spin resonance [Text] / Nefyodov Yu.A., Shchepetilnikov A.V., Kukushkin I.V., Dietsche W., and Schmult S. // Phys. Rev. B. – 2011. – V.88. – P.041307(R).
10. Hasan M.Z. Colloquium: Topological insulators [Text] / Hasan M.Z. and Kane C.L. // Rev. Mod. Phys. – 2010. – V.82. – P.3045.
11. Buttiker M. Edge-state physics without magnetic fields [Text] / Buttiker M. // Science. – 2009. – V.325. – P.278.
12. Ландау Л.Д. Диамагнетизм металлов [Текст] / Ландау Л.Д. // Zs. Phys. – 1930. – Т.64. – С.629.
13. Schubnikow L. Magnetische Widerstandsvergrosserung in Einkristallen von Wismut bei tiefen Temperaturen [Text] / Schubnikow L., de Haas W.J. // Leiden Commun. – 1930. – V.207a. – P.3.
14. de Haas W.J. Note on the dependence of the susceptibility of diamagnetic metals on the field / de Haas W.J., van Alphen P.M. [Text] // Leiden Commun. – 1930. – V.208d. – P.31.
15. Вертц Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР [Текст] / Вертц Дж., Болтон Дж. // Москва, Изд. “Мир”. – 1975. – С.550.
16. Dresselhaus G. Cyclotron Resonance of Electrons and Holes in Silicon and Germanium Crystals [Text] / Dresselhaus G., Kip A.F., and Kittel C. // Phys. Rev. – 1955. – V.98. – P.368.
17. Bagraev N.T. Quantum-Well Boron and Phosphorus Diffusion Profiles in Silicon [Text] / Bagraev N.T., Gehlhoff W., Klyachkin L.E., Naeser A., Rykov S.A. // Defect and Diffusion Forum. – 1997. – V.143. – P.1003.
18. Баграев Н.Т. Сверхпроводящие свойства кремниевых наноструктур [Текст] / Баграев Н.Т., Клячкин Л.Е., Кудрявцев А.А., Маляренко А.М., Романов В.В. // ФТП. – 2009. – Т.43. – С.1481.
19. Bagraev N.T. Superconductor properties for silicon nanostructure [Text] / Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., Romanov

- V.V. // Superconductivity - Theory and Applications, ed. by A. Luiz. – SCIYO 2010. – chap 4. – P.69.
20. Cavenett B.C. Optically detected magnetic resonance (O.D.M.R.) investigations of recombination processes in semiconductors [Text] / Cavenett B.C. // *Advances in Physics*. – 1981. – V.30. – P.475.
 21. Баграев Н.Т. Спиновая интерференция дырок в кремниевых наносандвичах [Текст] / Баграев Н.Т., Даниловский Э.Ю., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Машков В.А. // ФТП. – 2012. – Т.46. – С.77.
 22. Geim A.K. Resonant tunnelling between edge states in mesoscopic wires [Text] // Geim A.K., Main P.C., Brown C.V., Taboriski R., Carmona H., Foster T.J., Lindelof P.E., Eaves L. // *Surface Science*. – 1994. – V.305. – P.624.
 23. Baranov P.G. Acceptor Impurities in Silicon Carbide: Electron Paramagnetic Resonance and Optically Detected Magnetic Resonance Studies [Text] / Baranov P.G. // *Defect and Diffusion Forum*. – 1997. – V. 148-149. – P.129.
 24. Muzafarova M.V. Identification of the triplet state N-V defect in neutron irradiated silicon carbide by electron paramagnetic resonance [Text] / Muzafarova M.V., Il'in I.V., Mokhov E.V., Sankin V.I., Baranov P.G. // *Materials Science Forum*. – 2006. – V.527-529. – P.555.
 25. Вайнер В. С. ЭПР на вторичных термодфектах в триплетном состоянии в 6H-SiC [Текст] / Вайнер В. С., Вейнгер А. И., Ильин В. А., Цветков В. Ф. // ФТТ. – 1980. – Т.22. – С.3436.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Bagraev N.T. EDEPR of impurity centers embedded in silicon microcavities [Text] / Bagraev N.T., Gehlhoff .W., Gets D.S., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., Mashkov V.A., Romanov V.V. // *Physica B*. – 2009 – V.404. – P.5140-5143.
2. Bagraev N.T. EDESR and ODMR of Impurity Centers in Nanostructures Inserted in Silicon Microcavities [Text] / 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. // *Appl. Magn. Reson*. – 2010. – V.39 – P.113-135.
3. Баграев Н.Т. Квантование характеристик продольного транспорта дырок в кремниевых наноструктурах [Текст] / Баграев Н.Т., Брилинская Е.С., Гец Д.С., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Романов В.В., // ИТВ СПбГПУ, физ-мат науки СПбГПУ. – 2011. – Т.2. – С.41-47.
4. Баграев Н.Т. Осцилляции Шубникова-де Гааза и де Гааза – ван Альфена в кремниевых наноструктурах [Текст] / Баграев Н.Т., Брилинская Е.С., Гец Д.С., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Романов В.В. // ФТП. – 2011. – Т.4. – С.1503-1508.
5. Bagraev N.T. EDESR and ODMR of impurity centers in nanostructures inserted in silicon microcavities [Text] // 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., and Romanov V.V. // *Journal of Modern Physics*. – V.2. – P.544-558.
6. Bagraev N. EDESР of impurity centers in nanostructures inserted in silicon microcavities [Text] // Bagraev N., Danilovsky E., Gehlhoff W., Gets D., Klyachkin L., Kudryavtsev A., Kuzmin R., Malyarenko A., Mashkov V., Romanov V. // *Phys. Status Solidi B*. – 2012. – V.249 – P.1242-1246.
 7. Bagraev N. The Shapiro steps revealed by Josephson junctions embedded in silicon microcavities [Text] / Bagraev N., Danilovsky E., Gets D., Klyachkin L., Kudryavtsev A., Kuzmin R., Malyarenko A. // *Phys. Status Solidi B*. – 2012. – V.249. – P.1247-1252.
 8. Bagraev N., ODMR of single point defects in silicon nanostructures [Text] // Bagraev N., Danilovsky E., Gets D., Klyachkin L., Kudryavtsev A., Kuzmin R., Malyarenko A. // *Phys. Status Solidi B*. – 2012. – V.249. – P.1236-1241.
 9. Баграев Н.Т. Электрическое детектирование циклотронного резонанса дырок в кремниевых наноструктурах [Текст] / Баграев Н.Т., Гец Д.С., Даниловский Э.Ю., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М. // *ФТП*. – 2013. – Т.47. – С.503-509.