

На правах рукописи

Калинина Екатерина Александровна

Магнитно-резонансные исследования поведения доноров в кристаллах Si и Si_{1-x}Ge_x с модифицированными изотопным составом и спин-орбитальным взаимодействием

Специальность 1.3.11 - Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

Научный руководитель: **Ежевский Александр Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники физического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты: **Аверкиев Никита Сергеевич**

доктор физико-математических наук, профессор, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Центр физики наногетероструктур, заведующий сектором;

Юсупов Роман Валерьевич

кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, заведующий кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН

Защита состоится «3» июня 2026 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (Конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1621>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.340.01,
кандидат физико-математических наук

Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

На сегодняшний день развитие информационных и коммуникационных технологий невозможно представить без своевременной модернизации электронной компонентной базы. Повышение производительности приборов микро- и нанoeлектроники обусловлено количественным наращиванием функциональных элементов. Для качественного скачка необходим переход к новым способам конструирования приборов, в которых возможно использование такого свойства электрона, как спин. Спинтроника относится к перспективным направлениям развития научных исследований и технологических разработок. По сравнению с электронными устройствами спиновые обеспечили бы более высокую скорость реагирования на управляющий сигнал и потребовали бы меньших энергетических затрат.

Приборы спинтроники могут быть построены либо на локализованных спинах (квантовые компьютеры), либо с использованием транспорта носителей спина (спиновые фильтры и т.д.). В связи с этим большую привлекательность имеет развитие методов управления спиновыми состояниями, спинового транспорта, спиновой релаксации, дефазировки и фазовой когерентности в спиновых системах. Кремний является прекрасным кандидатом и для использования в спиновых приборах благодаря слабому спин-орбитальному взаимодействию (СОВ), большим временам спиновой релаксации, совместимости с современными технологиями. Слабое собственное спин-орбитальное взаимодействие для электронов в кремнии увеличивает время жизни спиновых состояний и приводит к большим длинам спиновой диффузии, что является необходимым свойством, например, для квантовых вычислений. С другой стороны, это приводит к слабым эффектам спиновой поляризации из-за малых углов спинового эффекта Холла, что осложняет управление спиновыми токами. Однако эффективность спин-орбитального рассеяния в кремнии может быть увеличена за счет легирования тяжелыми донорами V группы с большим спин-орбитальным потенциалом (СОП).

На сегодняшний день уже научились создавать одиночные и двойные квантовые точки в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и производить одно- и двухкубитовые операции, лежащие в основе работы квантового компьютера. Квантовый разряд, наименьший элемент для хранения информации в квантовом компьютере называется кубитом. Как и бит, кубит допускает два состояния — 0 и 1, но при этом может находиться в суперпозиции, то есть может принимать одновременно оба значения. Важной проблемой в создании полноценного квантового компьютера является проблема масштабирования спиновых электронных кубитов, которая в случае полупроводниковой платформы может быть решена с применением CMOS (MOSFET) технологии более рационально по сравнению с

другими концепциями, такими как построение кубитов на основе сверхпроводников и ионных ловушек.

При создании Si/SiGe 2D электронных систем с управляемыми квантовыми точками с помощью обогащающих и обедняющих затворов предполагается, что формируемые слои однородны по структуре и составу, имеют резкие границы и минимальную шероховатость. Все эти параметры существенно влияют на спиновые состояния и характеристики кубитов. В структурах Si/SiGe случайное распределение атомов германия в решетке кремния также влияет на электронные и спиновые состояния, модулируя кристаллический потенциал решетки и, соответственно, спин-орбитальный потенциал. Такие эффекты могут проявляться и в самой кремниевой квантовой яме, вследствие небольшого содержания германия и размытия границ квантовой ямы.

В качестве эффективной матрицы для кубитов все чаще рассматриваются моноизотопные бесспиновые материалы. Особенности используемых материалов можно изучать по поведению основного состояния доноров методом электронного парамагнитного (спинового) резонанса (ЭПР). Спектры ЭПР с естественным содержанием изотопов плохо разрешаются из-за уширения линий, вызванного сверхтонким взаимодействием с ядрами ^{29}Si и ^{73}Ge , что ограничивает возможности анализа экспериментальных данных. В диссертационной работе впервые исследованы изотопно-чистые сплавы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Обогащение матрицы кристалла бесспиновыми изотопами ^{28}Si и ^{72}Ge приводит к значительной изоляции спинов в квантовых состояниях, что увеличивает время спиновой когерентности. Это проявляется также в сужении линий в спектрах ЭПР, повышении разрешения спектров, обеспечении дополнительных возможностей для изучения структурных особенностей основного состояния доноров. На основе исследований спектров ЭПР электронов, связанных с мелкими донорами, такими как литий или фосфор, спины которых чувствительны к окружению в SiGe, возможно получить данные о свойствах моноизотопных материалов.

Эффекты спин-зависимого транспорта носителей также привлекают внимание исследователей во всем мире. Наряду с длительностью времени жизни спина в кремниевых структурах ключевыми задачами являются генерация и детектирование спиновых токов. Это важно для развития полупроводниковой спинтроники, где необходимы надежные средства записи, обработки и считывания информации с использованием спин-поляризованных носителей. Инжекция спинов в полупроводник и преобразование спиновой информации в электрический сигнал – одна из задач спинтроники.

Проведено большое количество экспериментальных и теоретических исследований по спиновой накачке (СН), явлениям передачи спинового тока в ферромагнитных структурах. Обнаружен спиновый эффект выпрямления, который генерирует постоянное напряжение за счет нелинейной связи между спиновым током и изменением сопротивления в магнитных структурах. С

помощью прецессии намагниченности в ферромагнетике, возбужденной ФМР, происходит накопление спинов на границе раздела спиновых подсистем. Из ферромагнетика в полупроводник течет диффузионный спиновый ток, в полупроводниковом слое происходит рассеяние спинов на большом спин-орбитальном потенциале доноров и возникает инверсный спиновый эффект Холла (ИСХЭ).

Целью работы является исследование поведения донорных центров фосфора и лития в изотопно-чистом твердом растворе $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при малом ($x < 3\%$) содержании германия методом электронного спинового резонанса (ЭСР), а также влияние доноров с большим спин-орбитальным взаимодействием (висмут, сурьма) на спиновое рассеяние в структурах $n\text{-Si/Pu}$.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование влияния атомов германия в изотопно-чистом твердом растворе $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при малом содержании Ge $x < 3\%$ на величины сверхтонкого взаимодействия, а также процессы спин-спиновой и спин-решеточной релаксации донорных электронов.
2. Изучение особенностей спектров спинового резонанса электронов, локализованных на изолированных центрах фосфора и лития в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при разном содержании Ge, анализ основного состояния и величины сверхтонкого взаимодействия.
3. Определение скоростей спин-спиновой и спин-решеточной релаксации для центров P и Li методом насыщения ЭПР линии, импульсным методом ЭПР и по уширению линии спектра. Сравнение и анализ полученных результатов.
4. Исследование угловых зависимостей положений линий донорных электронов Li в спектрах ЭСР в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ и определение их симметрии.
5. Изучение спин-зависимого рассеяния электронов проводимости на спин-орбитальном потенциале тяжелых доноров и процессов, приводящих как к перевороту спина, так и к инверсному спиновому эффекту Холла (ИСХЭ).

Научная новизна работы

1. Впервые исследованы процессы спиновой релаксации в моноизотопных сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, обогащенных бесспиновыми изотопами ^{28}Si (99,998%) и ^{72}Ge (99,984%). Такой твердый раствор является малоизученным по сравнению с ^{28}Si .
2. Впервые установлено, что атомы германия в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при содержании германия в кремнии на уровне 0,3 – 3% существенно влияют на спиновые характеристики электронов, локализованных при низких температурах на донорах фосфора и лития: резонансные частоты, параметры сверхтонких взаимодействий, скорости спиновой релаксации.
3. Впервые показано, что в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ существуют литиевые центры, различающиеся временами спиновой когерентности T_2 и спин-решеточной

релаксации T_1 . Спины донорных электронов атомов лития чувствительны к различному содержанию германия в ближайших координационных сферах вокруг лития.

4. Впервые в структуре $\text{Pv}/n\text{-Si:Bi}$ на основе теории спиновой накачки и диффузионной модели рассчитаны зависимости величины спиновых токов и напряжения инверсного спинового эффекта Холла (ИСХЭ) от параметров слоев кремния, легированных висмутом. Обосновано отсутствие сигналов инверсного спинового эффекта Холла при легировании слоя кремния только фосфором или сурьмой.

Теоретическая и практическая значимость работы

В диссертационной работе впервые рассмотрены спиновые процессы в моноизотопном твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, обогащенном бесспиновыми изотопами ^{28}Si (99,998%) и ^{72}Ge (99,984%). Одним из наиболее перспективных направлений применения таких кристаллов является создание приборов для квантовых вычислений. Результаты важны для исследования спиновых кубитов на основе полупроводниковых структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, слои которых обладают высокой степенью изотопной чистоты. Диссертационная работа выполнялась одновременно с выполнением проекта «Разработка спиновой концепции создания кубитов на основе эпитаксиальных гетероструктур Si/SiGe и исследование влияния окружения на параметры созданных кубитов», выполняемого при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках выполнения Дорожной карты «Квантовые вычисления» (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021 и контракт № P2193 от 14.12.2021). Часть результатов, опубликованных в статьях, включены в отчет по проекту.

Спиновый транспорт и спиновое рассеяние в кремниевых структурах, легированных тяжелым донором с большой спин-орбитальной связью, могут быть использованы при разработке приборов на эффектах спиновой поляризации и спинового рассеяния.

Методология и методы исследования

Диссертационная работа выполнена с использованием современного оборудования и традиционных хорошо зарекомендовавших себя экспериментальных методов исследования и получения полупроводниковых структур. Методы ионной имплантации и диффузионного легирования были использованы для получения кремниевых слоев с заданным уровнем легирования примесями, такими как: висмут, сурьма, фосфор, литий.

Для изучения особенностей основного состояния изолированных центров фосфора и лития в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ получены спектры спинового резонанса на спектрометре Bruker_EMX-plus-10/12 с гелиевым криостатом и системой контроля температуры (3,8–300 К) ER 4112 HV. Дополнительно спектры получены с помощью импульсного метода на ЭПР спектрометре Bruker-Elexsys 580/680 X- и W-диапазона (9,6 и 94 ГГц, соответственно) в Казанском

федеральном университете. С помощью спектрометра Bruker EMX-plus-10/12 получены спектры ферромагнитного резонанса (ФМР) для Si, легированного тяжелыми донорами с большой спин-орбитальной связью (висмут, сурьма, мышьяк).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. В изотопно-чистых монокристаллах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при $x = 0,39, 1,1, 1,2, 2,9$ ат. % уменьшение вклада от сверхтонких взаимодействий с ядрами ^{29}Si и ^{73}Ge приводит к сужению линий спектров ЭСР при низких температурах по сравнению с аналогичными кристаллами с природной композицией изотопов кремния и германия, что позволило в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ наблюдать спектры с хорошо разрешенной сверхтонкой структурой.
2. Атомы германия существенно влияют на спиновые характеристики электронов, локализованных при низких температурах на донорах фосфора в изотопно-чистом $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ даже при малом содержании германия $x < 3$ ат. %. Это проявляется в изменении констант сверхтонкого взаимодействия со спином ^{31}P , в результате чего наблюдаются дополнительные линии сверхтонкой структуры от пространственно-неэквивалентных донорных центров фосфора.
3. В $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при $x < 3$ ат. %, легированном литием, парамагнитные центры лития проявляют аксиальную (тригональную) симметрию с главной осью g-фактора параллельной направлению [111] кристалла. Понижение симметрии по сравнению с чистым кремнием обусловлено наличием в решетке атомов германия.
4. Показано, что основное состояние лития в изотопно-чистом $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$, также как и в кремнии, не является синглетным, в отличие от доноров V группы, что объясняет отсутствие в спектрах ЭПР линий СТВ с ядерным спином донора, характерных для центра в синглетном состоянии.
5. При генерации спиновых токов в кремнии методом спиновой накачки процессы рассеяния спинов с переворотом приводят к немонотонной зависимости напряжения ИСХЭ от концентрации тяжелого донора с большой спин-орбитальной связью при одинаковой толщине легированного слоя. С ростом концентрации Bi можно достичь значительно большей вероятности рассеяния спина на примеси с большой спин-орбитальной связью и, соответственно, значений ИСХЭ, но при этом уменьшая толщину легированного слоя кремния, из-за уменьшения длины спиновой диффузии с ростом N_{Bi} .

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений и выводов, представленных в настоящей диссертационной работе, обеспечиваются использованием современного научного оборудования, совокупностью хорошо апробированных экспериментальных и расчетных

методов исследования, корректных теоретических представлений при анализе и интерпретации полученных экспериментальных результатов, а также воспроизводимостью полученных экспериментальных данных.

Проведенные в ходе диссертационной работы исследования опираются на результаты работ, опубликованных по данной тематике ранее и приведенных в списке цитируемой литературы.

Основные результаты и положения настоящей работы представлены в статьях, опубликованных в цитируемых российских и зарубежных изданиях, и неоднократно обсуждались на научных конференциях.

Апробация работы

Результаты исследований, вошедших в настоящую диссертационную работу, были представлены в виде докладов и обсуждались на следующих конференциях:

XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII международных симпозиумах "Нанопфизика и наноэлектроника" (2020 - 2024 г, г. Нижний Новгород); XXV Нижегородской сессии молодых ученых (технические, естественные, гуманитарные науки), (2021 г, г. Нижний Новгород); 2-ой конференции «Физика конденсированных состояний» (2021 г, г. Черноголовка); 23 Всероссийской научной молодежной конференции «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника» (2021 г, г. Санкт-Петербург).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 15 научных работ: 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 10 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций.

Личный вклад соискателя

Личный вклад автора заключался в его непосредственном участии на всех этапах диссертационной работы, включая выполнение экспериментов, анализ и интерпретацию полученных результатов, оформление и подготовку по результатам исследований публикаций в виде статей и докладов на конференциях различного уровня. Постановка цели, задач и обсуждение полученных результатов диссертационного исследования, а также формулировка выводов проводилось совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. проф. Ежевским А.А., а также другими соавторами опубликованных работ.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Общий объём диссертации составляет 104 страницы, включая 39 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, указаны научная новизна и практическая значимость проводимых исследований, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, указаны степень достоверности и апробация результатов, отмечен личный вклад автора.

Первая глава состоит из пяти разделов и содержит анализ имеющихся в научной литературе данных.

В **Разделе 1.1** рассматриваются особенности полупроводниковых структур Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и их практическое применение. Исследовать данные полупроводниковые материалы можно по поведению известных донорных центров. Например, в **Разделе 1.2** обсуждаются электронные свойства мелких доноров V группы в Si, таких как фосфор, литий, висмут, сурьма. Благодаря хорошей их изученности в кремнии, эти донорные центры можно использовать в качестве спиновых зондов для изучения свойств сплавов кремния с германием.

Раздел 1.3 посвящен анализу сверхтонких взаимодействий электронов, локализованных на донорах. Сверхтонкая структура наблюдается у донорных электронов P, As, Bi, Sb, только у Li в Si она отсутствует, так как основное состояние не является синглетным. В литературе описаны структуры Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с естественным содержанием изотопов. Однако существенная очистка Si и Ge от изотопов ^{29}Si и ^{73}Ge позволяет минимизировать вклад сверхтонких взаимодействий со спинами ядер этих изотопов.

Раздел 1.4 литературного обзора посвящен механизмам спиновой релаксации. В рассмотренном интервале температур поведение донорных центров в кремнии определяется двухфононными процессами. Известно, что поведение доноров фосфора в кремнии хорошо описывается процессом Орбаха. Если основное состояние является мультиплетом, например, как у Li в Si, то существенным становится механизм Блюма-Орбаха.

В **Разделе 1.5** проанализированы работы, посвященные спиновому эффекту Холла (СХЭ). В инверсном эффекте (обратный СХЭ) чисто спиновый ток генерирует поперечный зарядовый ток. Эффекты, связанные со спиновым транспортом, можно наблюдать в режиме спиновой накачки, в котором используется ферромагнитный резонанс в структурах типа нормальный металл (NM) / ферромагнетик (FM), в результате чего, спиновый ток инжектируется из FM в NM. В литературе, в основном, описаны такие структуры. Структуры FM/n-Si с модифицированным спин-орбитальным взаимодействием в литературе не рассматривались. Спиновые эффекты могут быть использованы для генерации и контроля спиновых токов в легированных полупроводниках.

Во второй главе дается описание исследуемых образцов и методов их получения, приведена методика расчета скоростей спиновой релаксации методом насыщения и импульсным методом, а также представлена техника эксперимента.

Раздел 2.1 посвящен технике ЭПР-спектроскопии. Спектры ЭПР измерялись на спектрометрах Bruker-EMXplus-10/12 X-диапазона (частота 9,6 ГГц) и Bruker-Elexsys 580/680 X- и W-диапазонов (9,6 и 94 ГГц, соответственно) и представляет собой первую производную линии поглощения, по положению, форме линии которой возможно идентифицировать парамагнитные центры и их концентрации в образце, определить скорости и механизмы спиновой релаксации, симметрию центров и окружения.

В **Разделе 2.2** говорится о методах определения и расчета времен спин-спиновой и спин-решеточной релаксации доноров. В работе используется метод непрерывного насыщения и импульсный.

В **Разделе 2.3** дается описание исследуемых образцов и методов их получения. Монокристаллы $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$, обогащенные бесспиновыми изотопами ^{28}Si (99,998%) и ^{72}Ge (99,984%) были получены методом Чохральского (Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany). Легирование фосфором ($N_P \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) производилось в процессе роста с использованием в качестве лигатуры тонкого стержня ^{28}Si , выращенного методом бестигельной зонной плавки и легированного до концентрации $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ из газовой фазы (в качестве источника фосфора использовался фосфин - PH_3). Некоторые образцы дополнительно легированы литием с помощью диффузии при 300 °С в течение 30 мин. Концентрация введенного лития составляла $10^{16+17} \text{ см}^{-3}$. Для измерений угловых зависимостей спектров ЭПР образцы вырезались в виде столбиков $2 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$ в направлении [011]. Исследовалась серия образцов с разным содержанием германия ($x = 0,0039 - 0,05$) и донорной примеси лития и фосфора.

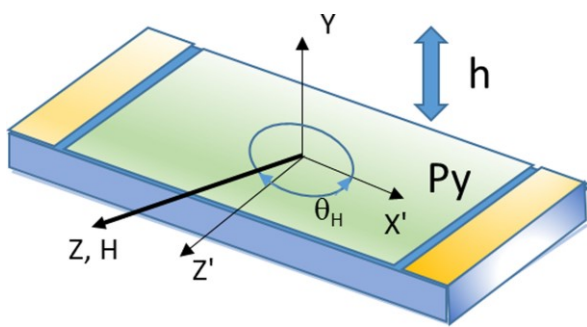


Рисунок 1. Схема структуры Py/n-Si:Bi(Sb):P/SOI для изучения генерации спинового тока и его детектирования методом ИСХЭ. h – микроволновое магнитное поле, H – постоянное поле

Исследуемые структуры Py/n-Si:Bi(Sb):P/SOI формировались по аналогичной методике. Сначала слой кремния толщиной 250 нм был нанесен методом молекулярно-лучевой эпитаксии на коммерческую пластину «кремний на изоляторе» (КНИ) (Soitec) с приборным слоем кремния толщиной 250 нм и скрытым оксидным слоем (BOX) толщиной 3 мкм (рисунок 1). В результате общая толщина слоя Si над BOX была увеличена до 500 нм, что соответствовало максимальной толщине слоя Si, который мог быть легирован висмутом с использованием ионной имплантации. Исходный уровень

легирования в слое был порядка 10^{15} см^{-3} (p-тип). Далее слой Si был легирован P и Bi ионной имплантацией ($Bi = 0,005 \text{ мкКл/см}^2$, $E = 24 \text{ кэВ}$; $P = 600 \text{ мкКл/см}^2$, $E = 100 \text{ кэВ}$) и отжигался при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 мин. Омические контакты Au/Ti ($1,0 \times 0,5 \text{ мм}^2$) и слой Ru ($1,0 \times 1,8 \text{ мм}^2$) были сформированы на слое Si ($1,0 \times 3,0 \text{ мм}^2$) с помощью взрывной литографии и магнетронного напыления.

В третьей главе исследовано поведение мелкого донорного центра фосфора в объемных кристаллах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ методом электронного спинового резонанса. Исследовалась сверхтонкая структура спектра донорного электрона, дающая информацию о плотности волновой функции донора в основном состоянии на ядре ^{31}P ($I = 1/2$), а также температурные зависимости скорости спиновой релаксации ($T = 3,5\text{--}30 \text{ K}$), позволившие анализировать механизм релаксации продольной компоненты T_1 , и величину долин-орбитального расщепления состояния донора.

В Разделе 3.1 обсуждается электронный спиновый резонанс донорных центров фосфора. Показано, что несмотря на уширение линий ЭСР донорных электронов за счет случайных деформаций, создаваемых растворенными атомами германия в кремнии, в изотопно-чистых монокристаллах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (^{28}Si (99,998%) и ^{72}Ge (99,984%)) при $x = 0,39, 1,2, 2,9 \text{ ат\%}$ наблюдались более узкие линии спектров ЭСР по сравнению с аналогичными кристаллами с природной композицией изотопов кремния и германия, что позволило наблюдать спектры с хорошо разрешенной сверхтонкой структурой (СТС), состоящие из пар линий СТС (ядерный спин фосфора $I = 1/2$). Удалось идентифицировать как минимум четыре различных (неэквивалентных) позиций доноров фосфора в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (рисунок 2), а при некоторых температурах и мощностях микроволнового поля наблюдалось до шести пар линий. Наиболее интенсивным спектрам соответствуют пары линий со сверхтонкими константами $a_1 = 42,5 \text{ Э}$, $a_2 = 33,9 \text{ Э}$, $a_3 = 27,5 \text{ Э}$ и $a_4 = 44,4 \text{ Э}$. Совокупность полученных результатов свидетельствует о существенном влиянии германия на состояния электронов, локализованных при низких температурах на донорах в SiGe, а также их спиновые характеристики: резонансные частоты, параметры сверхтонких взаимодействий, скорости спиновой релаксации.

В Разделе 3.2 рассчитаны времена спиновой релаксации донорных центров фосфора в сплаве $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$. Известно, что спин-решеточная релаксация для мелких доноров в кремнии и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в интервале температур $4\text{--}30 \text{ K}$ описывается механизмом Орбаха:

$$\frac{1}{T_1} \sim \frac{A_{so}}{h\Gamma_p} e^{-\varepsilon/kT} \quad (1)$$

Проведенные нами исследования эффектов насыщения при разных значениях микроволновой мощности P ($10\text{Lg}(P/P_0) = 0\text{--}40 \text{ дБ}$, где $P_0 = 200 \text{ мВт}$) при разных температурах, показали, что скорости T_1^{-1} возрастают по мере уменьшения констант СТВ (рисунок 3).

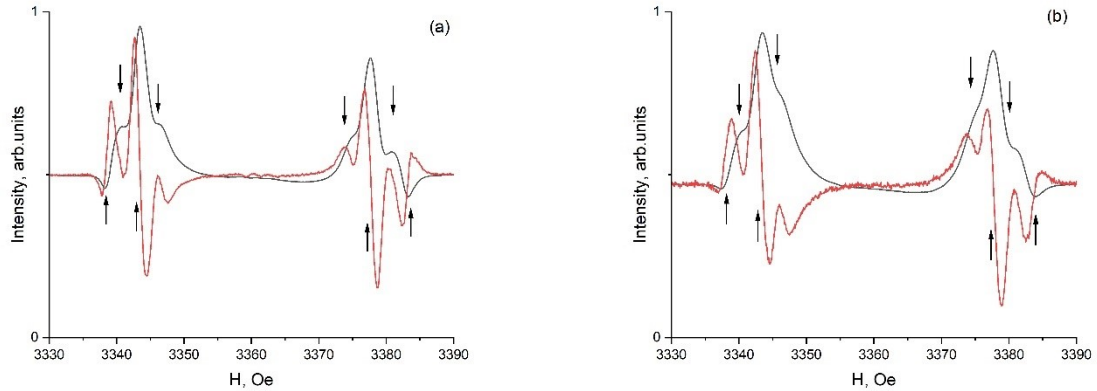


Рисунок 2. Линии сигнала поглощения и их производные спектра электронного спинового резонанса в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x\text{P}$, ($S = 1/2$, $I = 1/2$), измеренные при $T = 12$ К при разной концентрации германия: а – $x = 0,011$, б – $x=0,012$, в – $x=0,029$. Стрелками показаны положения линий, расщепленных СТВ

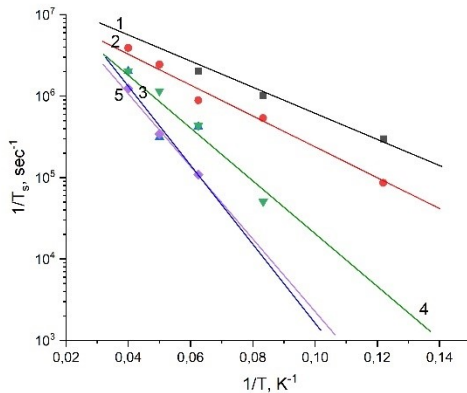


Рисунок 3. Скорости спиновой релаксации $1/T_S$ в зависимости от температуры, отражающие поведение с температурой скорости спин-решеточной релаксации $1/T_1$. 1, 2, 3 — для линий электронного спинового резонанса со сверхтонкими константами $a = 27,5, 33,9$ и $42,5$ Э ($x = 0,0039$) соответственно

Параметры долинно-орбитального расщепления, которые входят в показатели экспоненты (1), были более точно определены для спектров с константами СТВ a_1, a_2 . Они имеют значения 107 и 85 К (в единицах температуры) соответственно. Эти значения меньше, чем в чистом кремнии (≈ 134 К), причем даже для центра, у которого константа СТВ мало отличается от кремниевой, т.е. наблюдается уменьшение расстояния между синглетным и триплетным уровнями с уменьшением СТК.

В четвертой главе исследовано поведение доноров лития в объемных монокристаллических моноизотопных сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,0039-0,05$), обогащенных бесспиновыми изотопами

методом электронного парамагнитного резонанса, угловые зависимости и времена спиновой релаксации.

Раздел 4.1 посвящен ЭПР спектроскопии донорного центра лития в сплаве $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$. Предполагалось, что в сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,0039-0,05$) литий является примесью внедрения, располагаясь в тетраэдрической междоузлии, и обладает инверсной системой уровней по сравнению с донорами V группы.

Как видно из рисунка 4, удалось наблюдать спектры электронов, локализованных на донорах фосфора с хорошо разрешенной сверхтонкой

структурой (СТС), состоящие из пар линий СТС (наблюдалось четыре различных положения доноров фосфора в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$), и более узкие линии спектров ЭПР, связанных с литием с разрешенной тонкой структурой, отличающиеся локальной симметрией в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при x больше и меньше 1%.

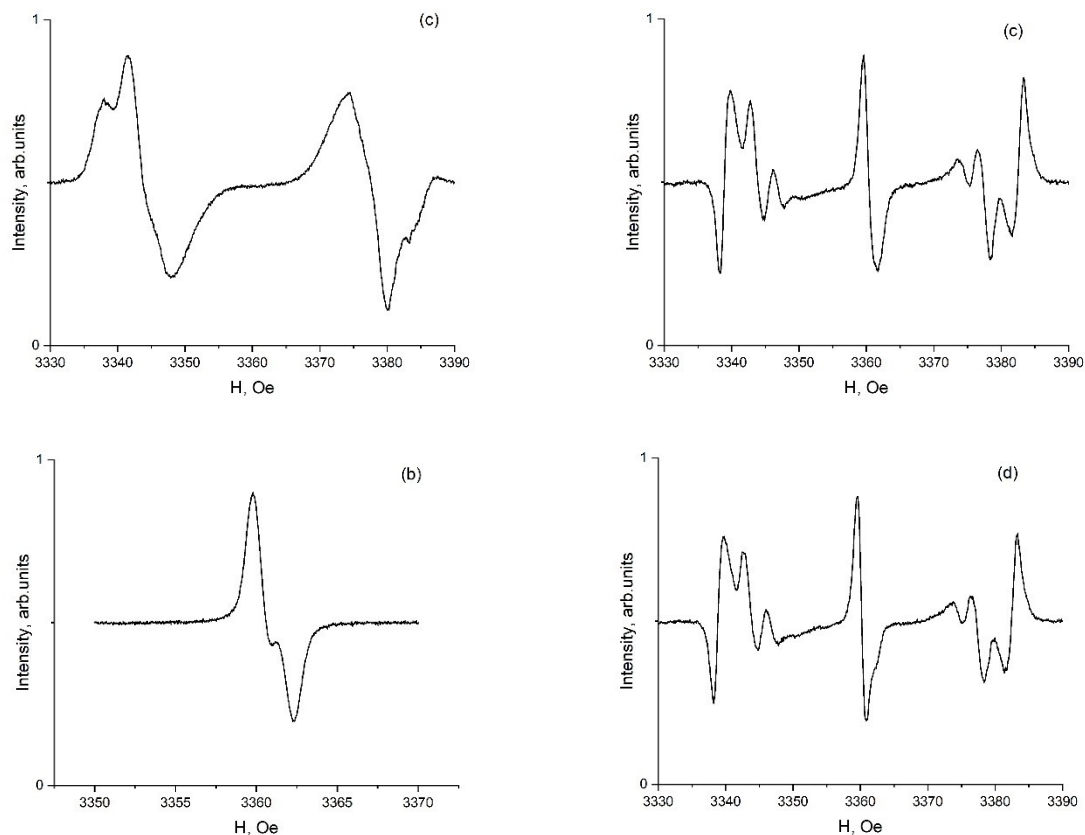


Рисунок 4. а — производные сигнала поглощения спектра ЭПР в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$: Li, $x = 0,0037$, $\theta = 0^\circ$ ($\text{H} \parallel [100]$). Стрелками показаны положения линий фосфора в нелегированном при росте кристалле, расщепленных СТВ; b — то же, при $\theta = 90^\circ$ ($\text{H} \parallel [011]$); c — производные сигнала поглощения спектра ЭПР в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$: Li, $x = 0,011$, $\theta = 0^\circ$ ($\text{H} \parallel [100]$); d — то же, при $\theta = 90^\circ$ ($\text{H} \parallel [011]$)

Связь этих линий с литием (центральные линии спектра между линиями СТС фосфора) не вызывает сомнения, так как они появляются только после легирования образцов литием, независимо от того, легировались ли образцы фосфором. При этом в нелегированном фосфором при росте кристалле $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, (р-типа проводимости), после легирования его литием, мы наблюдали слабые линии фосфора из-за подъема уровня Ферми над уровнем фосфора за счет перекомпенсации остаточного акцепторного бора литием.

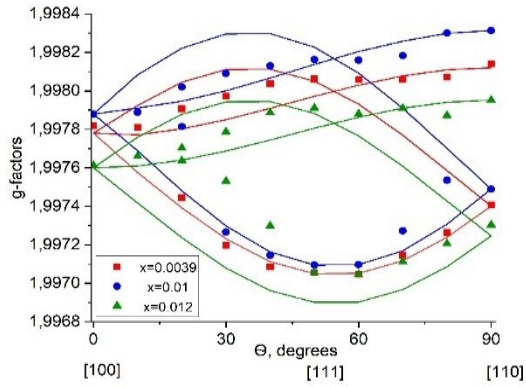


Рисунок 5. Угловые зависимости положения линий в спектрах ЭПР от ориентации магнитного поля B_0 для $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x:\text{Li}$ для $x = 0,0039, 0,01$ и $0,012$.

Угловое изменение положения линий ЭПР в спектрах ЭПР $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x:\text{Li}$ для $x = 0,39, 1$ и $1,2$ ат.% в зависимости от ориентации магнитного поля B_0 показано на рисунке 5. Символы представляют экспериментальные положения линий ЭПР, а сплошные линии соответствуют моделированию с использованием простого спинового гамильтониана, содержащего только электронное зеемановское взаимодействие тригональной симметрии в кубическом кристалле. Полученные параметры центра Li в монокристаллах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ составляют $g_{\parallel}([111]) = 1,9973$ и $g_{\perp} = 1,99805$. Как видно, изотопического

сужения недостаточно для разрешения всех линий в спектрах, так как имеется остаточное уширение, вызванное случайным распределением атомов германия.

В Разделе 4.2 рассчитаны времена спиновой релаксации донорных центров лития в сплаве $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$. Зависимости скоростей релаксации $1/T_1$ и $1/T_2$ от температуры, полученные импульсными методами, представлены на рисунке 6. Как для скорости поперечной, так и для продольной релаксации наличие двух компонент (быстрой и медленной) указывает на существование как минимум двух типов литиевых центров, различающихся скоростями дефазировки T_2 и спин-решеточной релаксации T_1 . Медленная релаксация соответствует большей изоляции атома лития от решеточного окружения и, по аналогии с фосфором, меньшему числу атомов германия в ближайших соседях лития. Это предположение подтверждают данные таблицы 1, из которой видно, как параметры n' и n'' для быстрой и медленной составляющих температурных зависимостей скоростей продольной спиновой релаксации $1/T_1 \sim T^n$ зависят от концентрации германия. Ниже результаты представлены для узкого диапазона концентраций, поскольку увеличение содержания германия приводит к значительному уширению спектров ЭПР.

Таблица.1 Параметры n' и n'' для быстрой и медленной компонент температурных зависимостей $1/T_1 \sim T^n$ скоростей продольной спиновой релаксации, полученных импульсными методами для образцов $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x:\text{Li}$

содержание Ge (x) в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$	n'	n''
0,0039	4.2	3,5
0,01	3.7	7,9
0,012	5,8	7.4

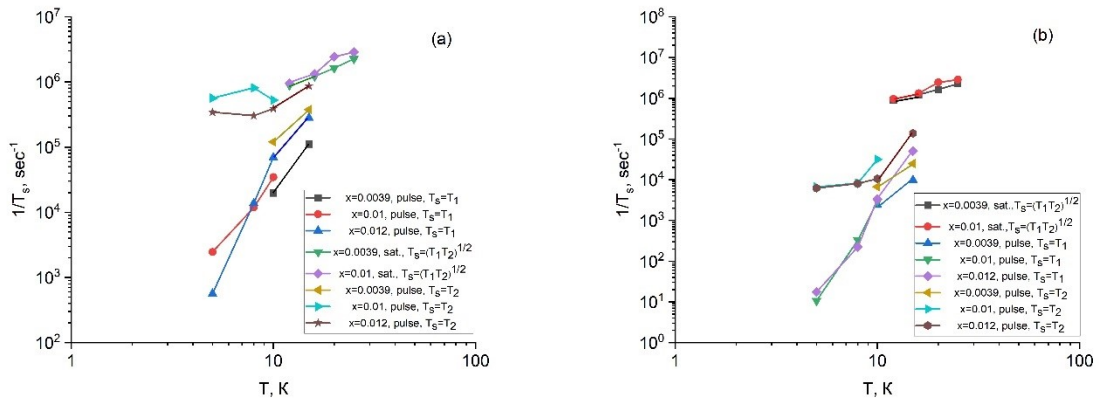


Рисунок 6. Зависимости скоростей спиновой релаксации $1/T_s$ от температуры, полученные импульсными методами и $1/\sqrt{(T_1 T_2)}$ методом насыщения для образцов $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$: Li, $x = 0,01, 0,012$ и $0,0039$; а – быстрая компонента, б – медленная компонента

Помимо методов импульсного ЭПР, исследовались процессы спиновой релаксации с использованием насыщения спектров ЭПР. Каждый метод может иметь свои особенности и определяет времена релаксации в своем конкретном диапазоне. Действительно, исследование эффектов насыщения сигнала ЭПР в образцах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, легированных литием, при различных значениях мощности СВЧ Р ($10 \cdot \log(P/P_0) = 0 \div 40$ дБ, где $P_0 = 200$ мВт) (рисунок 6) показал, что скорости спиновой релаксации в диапазоне температур 4—30 К и их температурные зависимости существенно отличаются от результатов, полученных импульсными методами для медленной компоненты, и достаточно хорошо согласуются с результатами для быстрой компоненты в диапазоне 15-30К. В целом метод насыщения должен показывать более высокие скорости релаксации, чем импульсный метод $1/\sqrt{T_1 * T_2}$, поскольку он измеряет потерю когерентности спинов в ансамбле из-за случайных флуктуаций локальных полей на каждом спине. В случае сплавов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ как быстрая компонента в импульсном методе, так и в методе насыщения показывает близкие значения скорости спиновой релаксации. Это может быть связано со значительным вкладом случайно расположенных атомов германия, которые создают, во-первых, локальные деформации, изменяющие энергии долин и, таким образом, модулирующие g-факторы, и, во-вторых, изменяющие спин-орбитальный потенциал в кремниевой решетке. Модуляция g-факторов, очевидно, порождает магнитный шум. В обоих случаях возникают условия, влияющие на скорости продольной и поперечной спиновой релаксации. Дополнительный вклад может дать спин-спиновое взаимодействие литиевых центров, поскольку содержание лития в образцах составляет $10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Существует два наиболее ярко выраженных положения центра лития в SiGe, скорости релаксации которых, различаются на порядок. Установлено, что

быстрая компонента релаксации, полученная с помощью импульсного ЭСР, и скорости релаксации, найденные методом насыщения, хорошо согласуются. При увеличении содержания германия в SiGe наблюдается уменьшение показателя степени на температурной зависимости, что указывает на смещение атома лития из центра междоузлия индуцированного присутствием германия.

В пятой главе представлены результаты исследований кремниевых структур, легированных тяжелым донором Bi, с применением двух разных методик: спинового резонанса и инверсного спинового эффекта Холла.

Для изучения спин-зависимых эффектов, вызванных тяжелым донором, кремний легируется сразу двумя донорами: одним с сильной спин-орбитальной связью (Bi), вторым со слабой (P). Легирование легким донором с большой концентрацией обеспечивает необходимую для наблюдения ЭПР спектров концентрацию носителей в полупроводнике, в то время как низкая концентрация Bi с одной стороны позволяет наблюдать процессы спин-зависимого рассеяния на тяжелых примесных центрах, а с другой обеспечивает большие времена релаксации в исследуемом материале.

В Разделе 5.1 обсуждаются вопросы, связанные с рассеянием спинов с переворотом и их влияние на процессы генерации спиновых токов в кремнии с электронным типом проводимости. На основе теории спиновой накачки и диффузионной модели рассчитаны величины спиновых токов и напряжения инверсного спинового эффекта Холла при варьировании типа донора и его концентрации и длин спиновой диффузии. Расчеты позволили найти зависимости величин эффектов от параметров слоев кремния, легированных висмутом (рисунок 7,8), и объяснить отсутствие сигналов инверсного спинового эффекта Холла при легировании слоя кремния только фосфором или сурьмой с концентрацией $N_d > 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

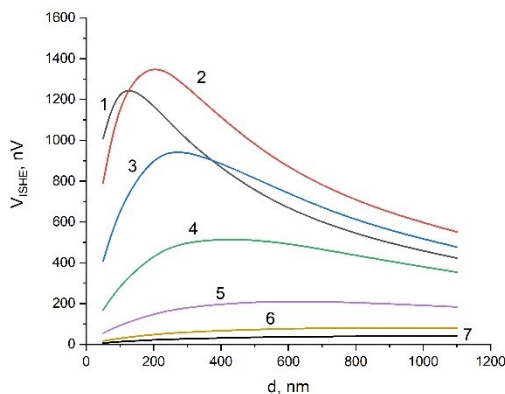


Рисунок 7. Величина ИСХЭ в зависимости от толщины слоя кремния d_n , легированного Bi для разных концентраций висмута N_{Bi} , см⁻³: 1 — 10^{18} , 2 — $3 \cdot 10^{17}$, 3 — 10^{17} , 4 — $3 \cdot 10^{16}$, 5 — 10^{16} , 6 — $3 \cdot 10^{15}$, 7 — 10^{15}

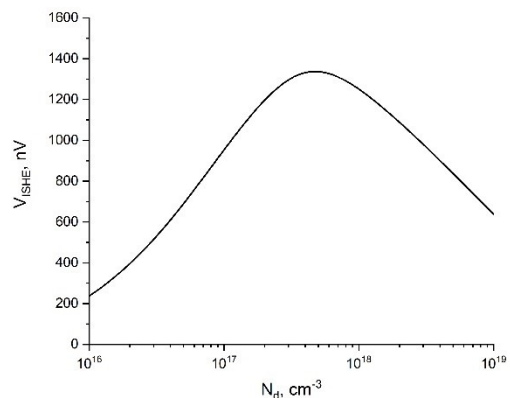


Рисунок 8. Зависимость напряжения ИСХЭ в максимуме зависимостей, представленных на рисунке 7, от концентрации висмута

В Разделе 5.2 показано, что в структуре $Pu/n\text{-Si:Bi:P}$, в которой Si легирован как P, так и тяжелым донором Bi, процесс спинового рассеяния с переворотом спина приводит к немонотонной зависимости напряжения ИСХЭ от концентрации тяжелого донора с сильной спин-орбитальной связью. Одновременное увеличение концентрации Bi и уменьшение толщины легированного слоя кремния приводит к высокому напряжению ИСХЭ. Это объясняется большей вероятностью рассеяния и уменьшением длины спиновой диффузии с увеличением N_{Bi} . Учет зависимости проводимости спинового смешения и параметра затухания от концентрации тяжелых доноров в Si приводит к существенному снижению напряжения ИСХЭ как для очень малых, так и для очень высоких N_{Bi} . Однако максимум напряжения, достигнутый при концентрации висмута несколько единиц на 10^{17} см^{-3} остается практически неизменным (рисунок 9).

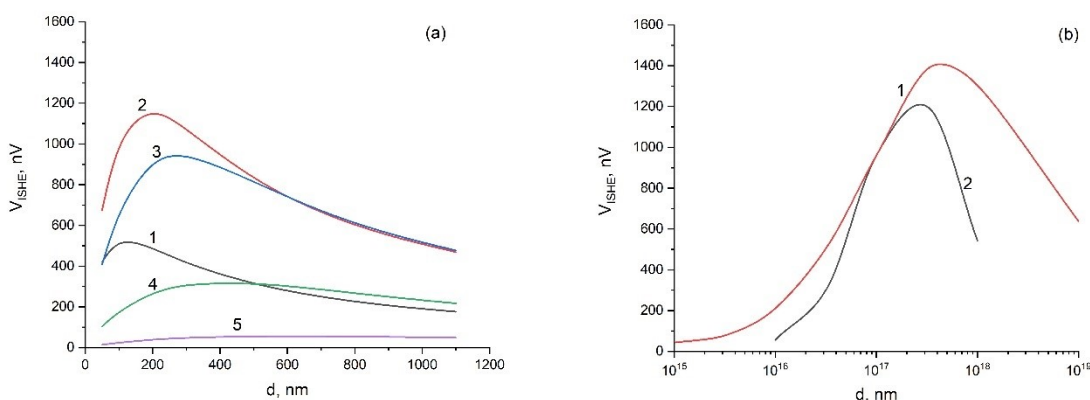


Рисунок 9. (а) Расчетное напряжение ИСХЭ в зависимости от толщины слоя кремния d_n для Si, легированного Bi до концентрации $N_{Bi} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (1), $3,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (2), 10^{17} см^{-3} (3), $3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (4), 10^{16} см^{-3} (5) получены с учетом зависимости проводимости интерфейса $g_r^{\uparrow\downarrow}$ и константы затухания α от концентрации центров рассеяния. (б) Напряжение ИСХЭ в максимумах зависимостей $V_{ISHE}(d_n)$ без (кривая 1) и с (кривая 2) коррекцией $g_r^{\uparrow\downarrow}$ и α

Установлено, что в случае легирования сурьмой сигнал ИСХЭ не наблюдался на фоне шумов, причиной является малый спин-орбитальный вклад в рассеяние и малый спиновый угол Холла для сурьмы и фосфора по сравнению с тяжелыми донорами, такими как висмут.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Совокупность полученных результатов свидетельствует о существенном влиянии германия на состояния электронов, локализованных при низких температурах на донорах в SiGe, а также их спиновые характеристики: резонансные частоты, параметры сверхтонких взаимодействий, скорости спиновой релаксации.
2. В изотопно-чистом $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ даже при малом содержании германия $x < 3$ ат. атомы германия влияют на процессы спин-решеточной релаксации. Наблюдается уменьшение расстояния между синглетным и триплетным уровнями с уменьшением константы сверхтонкого взаимодействия.
3. Изучение лития в сплавах кремния с германием интересно не только с точки зрения его индивидуальных свойств, но и возможности рассматривать его в качестве спинового зонда, изучая особенности сплава $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$, имеющего важное практическое применение в качестве барьерных слоев в структурах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x / ^{28}\text{Si} / ^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ для построения спиновых кубитов.
4. На основе теории спиновой накачки и диффузионной модели проведены расчеты зависимости напряжения ИСХЭ от параметров слоев кремния, легированных различными донорами. Наша теория объясняет отсутствие сигнала ИСХЭ на шумовом фоне в эксперименте, когда слой кремния легирован только фосфором или сурьмой с концентрацией $N_d = (10^{17} \div 10^{19}) \text{ см}^{-3}$. Причиной является малый спин-орбитальный вклад в рассеяние и малый спиновый угол Холла для сурьмы и фосфора по сравнению с тяжелыми донорами, такими как висмут.
5. Показано, что в структуре $\text{P}_y/n\text{-Si:Bi:P}$, в которой Si легирован P и тяжелым донором Bi, процесс спинового рассеяния с переворотом спина приводит к немонотонной зависимости напряжения ИСХЭ от концентрации тяжелого донора с сильной спин-орбитальной связью. Одновременное увеличение концентрации Bi и уменьшение толщины легированного слоя кремния приводит к значительно более высокому напряжению ИСХЭ по сравнению с существующим экспериментом. Это объясняется большей вероятностью рассеяния и уменьшением длины спиновой диффузии с увеличением N_{Bi} . Учет зависимости проводимости спинового смещения и параметра затухания от концентрации тяжелых доноров в Si приводит к существенному снижению напряжения ИСХЭ как для очень малых, так и для очень высоких N_{Bi} . Однако максимум напряжения, достигнутый при концентрации висмута несколько единиц на 10^{17} см^{-3} для параметров эксперимента, остается практически неизменным.

Список работ, опубликованный автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в Scopus и рекомендованных ВАК РФ

- A1. Kalinina, E.A. Electron Spin Resonance of Lithium Related Donor Centers in Bulk $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ Crystals Enriched in ^{28}Si and ^{72}Ge Isotopes. / E.A. Kalinina, A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, D.G. Zverev, F.F. Murzakhanov, N.V. Abrosimov // Applied Magnetic Resonance. – 2024. – V. 55. – P. 551–564
- A2. Ezhevskii, A.A. Behavior of Phosphorus Donors in Bulk Single-Crystal Monoisotopic $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ Alloys / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, P.G. Sennikov, E.A. Kalinina, N.V. Abrosimov // Semiconductors. – 2020. – V. 54. – N. 9. – P. 1123–1126.
- A3. Ezhevskii, A.A. Behavior of Lithium Donors in Bulk Single-Crystal Monoisotopic $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ Alloys / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, P.G. Sennikov, E.A. Kalinina, N.V. Abrosimov // Semiconductors. – 2020. – V. 54. – N. 10. – P. 1336–1340.
- A4. Ezhevskii, A.A. Generation of Spin Currents in n-Si Doped with Phosphorus, Antimony, and Bismuth and the Role of Spin-Flip Scattering Processes / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, E.A. Kalinina, A.V. Novikov // Semiconductors. – 2021. – V. 55. – N. 8. – P. 654–658.
- A5. Ezhevskii, A.A. Impact of spin-flip scattering on spin current and inverse Spin-Hall effect in silicon doped by bismuth, antimony or phosphorus / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, E.A. Kalinina, E.A. Karashtin, D.V. Yurasov // Physica B: Condensed Matter. – 2023. – V. 674. – P. 415551.

Доклады в материалах научных конференций

- A6. Поведение доноров лития в объемных монокристаллических моноизотопных сплавах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ / А.А. Ежевский, А.В. Сухоруков, Д.В. Гусейнов, Е.А. Матвеева, Н.В. Абросимов // Труды XXIV Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". – 2020. – Т. 2. – С. 565-566.
- A7. Поведение доноров фосфора в объемных монокристаллических моноизотопных сплавах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ / А.А. Ежевский, А.В. Сухоруков, Д.В. Гусейнов, Е.А. Матвеева, Н.В. Абросимов // Труды XXIV Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". – 2020. – Т. 2. – С. 567-56.
- A8. Магнитно-резонансные исследования состояний мелких доноров в монокристаллическом $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, обогащенном бесспиновыми изотопами ^{28}Si и ^{72}Ge / А.А. Ежевский, Е.А. Калинина, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков // Сборник тезисов XXV Нижегородской сессии молодых ученых (технические, естественные, гуманитарные науки). – 2020. – С. 231-232.
- A9. Процессы рассеяния спинов с переворотом и их влияние на генерацию спиновых токов в n-кремнии, легированном фосфором, сурьмой и висмутом / А.А. Ежевский, А.В. Сухоруков, Д.В. Гусейнов, Е.А. Калинина, А.А.

- Новиков, Д.В. Юрасов, Н.С. Гусев // Труды XXV Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". – 2021 – Т. 2. – С. 658-659.
- A10. Магнитно-резонансные исследования монокристаллов $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ / А.А. Ежевский, Е.А. Калинина, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков // Сборник тезисов 2-ой конференции «Физика конденсированных состояний». – 2021. – С.131.
- A11. Генерация и детектирование спиновых токов в структурах на основе кремния: $\text{P}_y/\text{Si}:\text{Bi}:\text{P}$, $\text{P}_y/\text{Si}:\text{Sb}$ / Н.И. Аверина, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков И.А. Зубанов, Е.А. Калинина // Тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и нанoeлектроника». – 2021. – С.5.
- A12. Доноры лития в объемных монокристаллических моноизотопных сплавах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ / И.А. Зубанов, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков Н.В. Абросимов Е.А. Калинина, Н.И. Аверина // Тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и нанoeлектроника». – 2021. – С.9.
- A13. Возбуждение ФМР и спиновых токов электрической компонентой микроволнового поля в структурах $\text{P}_y/\text{n-Si}:\text{Bi}$ с участием спин-орбитального взаимодействия / Ежевский А.А., Гусейнов Д.В., Сухоруков А.В., Калинина Е.А. // Труды XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2022. – Т.1. – С. 236-237.
- A14. Спиновый ток в структурах $\text{P}_y/\text{n-Si}$: ФМР и инверсный спиновый эффект Холла. / Е. А. Калинина, А. А. Ежевский, Д. В. Гусейнов, Н. И. Аверина, Н. С. Гусев, Е. А. Караштин // Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2024. – Т. 1. – С. 250-251.
- A15. Спиновая релаксация доноров лития в изотопно-чистых монокристаллах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ / Е. А. Калинина, А. А. Ежевский, Д. В. Гусейнов, А. В. Сухоруков, Д. Г. Зверев, Ф. Ф. Мурзаханов, Н. В. Абросимов // Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2024. – Т. 2. – С. 680-681.