

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

На правах рукописи



Лихачев Кирилл Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИНОВЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В
ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В
ВЕКТОРНОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель:

Баранов Павел Георгиевич, д. ф.-м. н., главный научный сотрудник лаборатории микроволновой спектроскопии кристаллов, ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

Константинова Елизавета Александровна, д. ф.-м. н., профессор кафедры общей физики и наноэлектроники МГУ имени М.В. Ломоносова

Мурзаханов Фадис Фанилович, к. ф.-м. н., научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Перспективные платформы для спиновых квантовых манипуляций», ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Защита состоится «5» ноября 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.01.25 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и на сайте <http://www.ioffe.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета ФТИ 34.01.01.25.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета

ФТИ 34.01.01.25

Д. ф.-м. н.



М.А. Семина

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Измерение слабых магнитных полей с высоким пространственным разрешением является одной из актуальных задач современной физики и смежных дисциплин. Необходимость в этом возникает в широком круге приложений: от получения пространственного распределения токов в интегральных схемах и диагностики магнитных структур в нанометаллургии до регистрации биомagnetных сигналов нейронных сетей и кардиомиоцитов. Традиционные высокочувствительные СКВИД-магнитометры (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID), с собственным шумом сенсора $1,3 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ при площади $7 \times 7 \text{ мм}^2$ [1,2] требуют криогенного охлаждения до температур около $4,2 \text{ К}$ [3]. Их применение в магнитоэнцефалографии и магнитокардиографии [4,5] требует громоздких криогенных систем и специализированных магнитно-экранированных помещений, что принципиально ограничивает мобильность и пространственное разрешение. В отличие от СКВИД-магнитометров, атомные SERF (Spin-Exchange Relaxation-Free, SERF) магнитометры работают при комнатной температуре, что исключает необходимость криогенного охлаждения. Их чувствительность достигает $0,16 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ [6], однако пространственное разрешение ограничено конечными размерами газовой ячейки и необходимостью магнитного экранирования [7,8]. Таким образом, несмотря на рекордную чувствительность, ни СКВИД-магнитометры, ни SERF-магнитометры не отвечают одновременно требованиям работы при комнатной температуре и субмикронного пространственного разрешения.

За последние два десятилетия сформировалось принципиально иное направление квантовой сенсорики — магнитометрия на основе центров окраски, также называемых спиновыми центрами, представляющих собой точечные дефекты в кристаллической решетке широкозонных полупроводников [9,10]. Спиновые состояния таких центров могут быть оптически инициализированы, контролируются и считаны при комнатной температуре. Важнейшей особенностью является оптическая адресуемость как одиночных центров, так и их ансамблей: спиновое состояние инициализируется лазерным излучением, а считывание осуществляется по интенсивности фотolumинесценции (ФЛ); управление спиновыми состояниями выполняется с помощью микроволнового поля в режиме оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) [11]. Атомарные размеры спинового центра и возможность его размещения на конце острия зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) открывают путь к сканирующим квантовым сенсорам с нанометровым пространственным разрешением [12]. Наиболее изученной среди твердотельных спиновых

платформ является NV центр в алмазе, на базе которого реализованы высокочувствительная магнитометрия с использованием одиночного центра (чувствительность к переменным полям достигает единиц пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [13,14] и сканирующая магнитная микроскопия с нанометровым разрешением [12,15].

Вместе с тем применение NV-центров в алмазе обладает рядом ограничений. Четыре равновероятных ориентации NV-центра вдоль осей $\langle 111 \rangle$ создают принципиальные трудности для векторной магнитометрии [10,16]. Кроме того, реализация высокочувствительной магнитометрии на NV-центрах требует использования микроволнового поля для управления спиновыми состояниями, что может приводить к паразитному нагреву при работе с биологическими объектами [10]. Альтернативой служит карбид кремния (SiC) — широкозонный полупроводник, характеризующийся высоким уровнем технологического развития, широкой запрещенной зоной (3,2 эВ для 4H-SiC) и развитой промышленной базой [17,18]. Вакансионные центры в виде вакансии кремния V_{Si} в 4H-SiC обладают квартетным основным состоянием ($S = 3/2$). Каждое неэквивалентное кристаллографическое положение порождает центр с характерной длиной волны бесфоновой линии (БФЛ) [19–21]. Расщепление тонкой структуры V2-центра (один из подвидов центров V_{Si}) составляет $D/h \approx 35$ МГц [22], что почти на два порядка меньше, чем у NV-центра в алмазе ($D \approx 2,87$ ГГц). Столь малое расщепление позволяет наблюдать эффект антипересечения уровней (Level Anti-Crossing, LAC) уже при слабых магнитных полях порядка $\sim 1,25$ мТл, на порядок меньше полей, требуемых для LAC в алмазе (~ 50 мТл). Это принципиальное отличие открывает возможность полностью оптической магнитометрии без применения микроволновых полей, что критически важно для биологических и медицинских приложений.

Несмотря на активное развитие исследований вакансионных центров в карбиде кремния как перспективных квантовых сенсоров, ряд принципиальных задач оставался нерешенным. Структура спектра антипересечения уровней 4H-SiC, обусловленная сверхтонким взаимодействием с ядрами ^{29}Si , не была систематически исследована для кристаллов с природным изотопным составом при комнатной температуре, хотя параметры сверхтонкого взаимодействия для V2-центра установлены методами импульсного электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР) [20,23]. Отсутствовал метод векторной магнитометрии без микроволнового возбуждения для SiC [22,24]. Наконец, для алмаза успешно реализованная технология создания сканирующих квантовых сенсоров путем интеграции нано- и микрочастиц

широкозонных полупроводников с зондами АСМ [14] оставалось нерешенной задачей для SiC. В настоящей диссертации перечисленные проблемы решены.

Целью работы является разработка физических основ и экспериментальная реализация полностью оптических методов векторной магнитометрии на основе явления антипересечения спиновых уровней в объёмном кристалле карбида кремния, а также создание легко воспроизводимого сканирующего квантового сенсора магнитного поля на основе коммерчески доступной микрочастицы алмаза с NV-центрами, интегрированной с зондом атомно-силового микроскопа.

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

1. Экспериментальное наблюдение и установление структуры спектров LAC V2-центра в кристалле $4H$ -SiC с природным изотопным составом при комнатной температуре: обнаружение антипересечений для спиновых переходов системы с $S = 3/2$, обусловленных сверхтонким взаимодействием с ядром изотопа ^{29}Si , и верификация результатов путем сравнения с численным моделированием спектров на основе спинового гамильтониана.
2. Разработка и экспериментальная реализация оптической векторной магнитометрии на основе спектроскопии антипересечения уровней, включая компенсационный подход к последовательному определению всех трех проекций магнитного поля, а также ускоренную процедуру определения компонент поля с использованием калиброванных модифицирующих полей, и экспериментальную оценку предельной чувствительности магнитометра.
3. Разработка последовательности операций по созданию сканирующих квантовых сенсоров на основе микрочастиц алмаза с NV-центрами, полученных методом спекания детонационных наноалмазов, включая их прецизионную интеграцию с зондами АСМ и характеризацию ОДМР-сигнала; а также отработка технологического маршрута получения наночастиц $6H$ -SiC с вакансионными центрами V_{Si} методами механохимического измельчения и ионного облучения как первого шага к созданию сканирующего LAC-магнитометра на основе SiC.
4. Комплексная характеристика изготовленных гибридных АСМ-зондов методами конфокальной спектроскопии ФЛ и КРС, а также экспериментальная проверка работоспособности созданных сенсоров путем регистрации сигналов магнитного резонанса в известном внешнем магнитном поле.

Методы исследования

Основным методом, используемым в данной работе, является оптическая спектроскопия антипересечения спиновых уровней (спектроскопия антипересечения уровней) с синхронным детектированием сигнала ФЛ. Кроме того, в работе применялись: ОДМР, конфокальная микроскопия и спектроскопия ФЛ, спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), атомно-силовая микроскопия. Оптические измерения выполнялись на базе двух конфокальных систем НТ-МДТ Спектрум Инструментс (NTEGRA Spectra), модифицированных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Спектры антипересечения уровней V2-центров в 4H-SiC регистрировались при возбуждении лазером с $\lambda = 785$ нм в схеме с трехосевыми катушками Гельмгольца. ОДМР-спектры NV-центров получены при возбуждении лазером с $\lambda = 532$ нм и воздействием СВЧ-полем в диапазоне 2,7–3,1 ГГц. Численное моделирование спектров антипересечения уровней выполнялось путем диагонализации полного спинового гамильтониана, включающего члены тонкой структуры, Зеемановского взаимодействия и сверхтонкого взаимодействия с ядрами ^{29}Si .

Научная новизна

Методом оптической спектроскопии антипересечения уровней при комнатной температуре в кристалле 4H-SiC с природным изотопным составом впервые экспериментально обнаружены и идентифицированы антипересечения разрешенных спиновых переходов вакансионного V2-центра с $S = 3/2$, возникающие вследствие сверхтонкого взаимодействия электронного спина с ядром изотопа ^{29}Si ($I = 1/2$), занимающим одно из 12 эквивалентных положений во второй координационной сфере вакансии Si. Показано, что сателлитные линии в спектре антипересечения уровней несут прямую информацию о константах сверхтонкого взаимодействия и обеспечивают высокую чувствительность спектра к ориентации внешнего магнитного поля.

Разработан и экспериментально реализован новый метод оптической векторной магнитометрии, не требующий микроволнового излучения. Впервые показано, что сателлитные линии LAC, обусловленные сверхтонким взаимодействием с ядром изотопа ^{29}Si , несут информацию не только о величине, но и об ориентации магнитного поля, что позволяет разработать новый подход к полностью оптической векторной магнитометрии. Метод основан на компенсации внешнего магнитного поля управляемыми калибровочными полями катушек Гельмгольца по изменению спектра антипересечения уровней и обеспечивает чувствительность к продольной компоненте поля на уровне $100 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ и к перпендикулярной компоненте на уровне $10 \text{ мкТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ при комнатной температуре. Предложен и апробирован ускоренный вариант метода с использованием

калиброванных модифицирующих полей, обеспечивающий детерминированное время измерения.

Разработана универсальная методика закрепления одиночных нано- и микрочастиц широкозонных полупроводников с коммерческими АСМ-зондах с использованием УФ-отверждаемого адгезива. На основе анализа капиллярных сил и вязкого трения обоснованы оптимальные параметры захвата (сила прижима 200–700 нН). Верификация методами КРС и ФЛ-спектроскопии подтвердила сохранение кристаллической структуры и функциональности спиновых центров после интеграции с зондом.

Для целей сканирующей магнитометрии предложены и охарактеризованы микрокристаллы алмаза, полученные НРНТ-спеканием детонационных наноалмазов без использования металлических катализаторов и без дополнительного облучения. Показано, что такие кристаллы содержат NV-центры с низким уровнем внутренних деформаций ($2E = 12,2 \pm 0,2$ МГц), что свидетельствует о высокой степени структурного совершенства и потенциально длительном времени спиновой когерентности, а также о существенно меньшей стоимости по сравнению с традиционно используемыми синтетическими алмазами.

Все полученные в работе результаты являются новыми и направлены на решение практических задач квантовой сенсорики магнитных структур и биологических объектов.

Научная и практическая значимость

Проведенные исследования расширяют фундаментальные знания об оптических и магнитных свойствах вакансионных спиновых центров в SiC. Систематически установлена структура спектра антипересечения уровней в кристаллах с природным изотопным составом, определен вклад сверхтонкого взаимодействия с ядрами изотопа ^{29}Si и проведена идентификация всех зарегистрированных резонансов. Полученные данные составляют необходимую научную основу для разработки полностью оптических магнитометров на основе эффекта антипересечения уровней в SiC.

Разработанный метод оптической векторной магнитометрии представляет практический интерес благодаря отсутствию необходимости в микроволновом возбуждении спиновых переходов, что упрощает конструкцию сенсора, снижает его габариты и исключает паразитный нагрев объекта измерения. Такой подход, реализуемый без применения СВЧ-полей, позволяет говорить о полностью оптической магнитометрии. Достигнутая чувствительность к постоянным полям и субмикронное пространственное разрешение открывают перспективу использования метода в биоманитных исследованиях, включая регистрацию слабых магнитных полей нейронной и кардиомиоцитной активности,

а также в задачах микроэлектроники, например, для диагностики токораспределения в интегральных схемах и контроля магнитных наноструктур. Разработанные на основе микрочастиц алмаза с NV-центрами сканирующие зонды демонстрируют параметры, достаточные для субмикронной сканирующей магнитной микроскопии. Полученные результаты зарегистрированы в двух патентах на изобретения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура в зарегистрированном по фотолюминесценции спектре антипересечения уровней основного состояния в магнитном поле центра V2 в кристалле 4H-SiC обусловлена сверхтонким взаимодействием электронного спина $S = 3/2$ с ядерным спином $I = 1/2$ изотопа кремния ^{29}Si .

2. Анизотропия сверхтонкой структуры в спектре антипересечения спиновых уровней центра V2 в 4H-SiC позволяет при комнатной температуре без применения микроволнового возбуждения определить все компоненты вектора внешнего магнитного поля с чувствительностью $100 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ и $10 \text{ мкТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ параллельно и перпендикулярно оси c кристалла, соответственно.

3. Микрокристаллы алмаза, полученные методом спекания детонационных наноалмазов, содержат образованные без облучения NV-центры, с низким уровнем внутренних напряжений ($2E = 12,2 \pm 0,2 \text{ МГц}$), что обеспечивает их высокую спиновую когерентность. Интеграция таких микрокристаллов с зондом атомно-силового микроскопа дает возможность использования данного доступного материала в качестве активного элемента сканирующего квантового магнитометра с субмикронным разрешением по сигналам оптически детектируемого магнитного резонанса.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением современных экспериментальных методов, сопоставлением результатов исследования спектров магнитного резонанса на разных частотах, а также сравнением с результатами, полученными другими исследователями. Описываемые в работе результаты опубликованы в реферируемых научных журналах и были представлены на российских и международных конференциях.

Апробация результатов исследования

Результаты работы и основные положения были представлены автором на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. XV российская конференция по физике полупроводников, Нижний Новгород, 3–7 октября 2022 г., стендовый доклад: «Изготовление и исследование квантовых сенсоров,

совмещенных с атомно-силовым микроскопом, на основе вакансионных центров наночастиц $6H\text{-SiC}$ »

2. Международная молодежная конференция «Физика А.СПб», Санкт-Петербург, 17–21 октября, 2022 г., стендовый доклад: «Совмещенные с атомно-силовой микроскопией сенсоры магнитного поля на основе наночастиц $6H\text{-SiC}$ »

3. Всероссийская научная молодежная конференции «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника», 28 ноября – 2 декабря 2022 г., устный доклад: «Разработка сенсоров магнитного поля на основе наночастиц SiC гексагонального поли типа, совмещенных с атомно-силовой микроскопией»

4. Международная молодежная конференция «Физика А.СПб», Санкт-Петербург, 23–27 октября 2023 г., стендовый доклад: «Исследование свойств ОДМР активных спеченных детонационных наноалмазов с NV-центрами, полученных без облучения, и реализация магнитометрии на их основе»

5. 21th International School-Conference “Magnetic resonance and its applications”, Saint Petersburg, 1–5 April 2024, poster presentation: “All-optical scanning spectroscopy of anticrossing of electron and nuclear spin levels in a SiC crystal of hexagonal polytype”

6. XXX российская конференция по физике полупроводников, Нижний Новгород, 3–7 октября 2026 г., стендовый доклад: «Изготовление и исследование квантовых сенсоров, совмещенных с атомно-силовым микроскопом, на основе вакансионных центров наночастиц $6H\text{-SiC}$ »

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или в соавторстве при его непосредственном участии на всех этапах исследований. Автор лично проводил экспериментальные исследования по оптической спектроскопии антипересечения уровней на кристаллах $4H\text{-SiC}$, включая измерения, обработку и интерпретацию полученных спектров. Непосредственное участие автора включало настройку и проведение экспериментов на сканирующем конфокальном микроскопе, работу с системой генерации магнитных полей и регистрацию сигналов ФЛ. Автор участвовал в разработке и реализации методики изготовления сканирующих квантовых сенсоров на основе наночастиц $6H\text{-SiC}$, включая этапы модификации зондов АСМ и их характеристики методами конфокальной микроскопии и спектроскопии КРС. Значительный вклад автор внес в разработку метода полностью оптической векторной магнитометрии, в частности в создание и апробацию метода ускоренного измерения с использованием модифицирующих калибровочных полей. Автором разработаны

алгоритмы обработки спектров антипересечения уровней и определения параметров магнитного поля. Автор активно участвовал в выполнении работ по госконтрактам, грантам Министерства образования науки РФ, по грантах РФФИ и РНФ, принимал ключевое участие в подготовке статей, докладов и выступлений на научных конференциях и семинарах.

Публикации

Автором диссертации опубликовано 6 статей, отражающих результаты представленной диссертации, в рецензируемых научных журналах уровня 1, 2 или 3 «Белого списка» Российского центра научной информации или индексируемых базами данных Scopus, Web of Science Core Collection; а также зарегистрировано 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 34 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 114 библиографических ссылок.

Во введении формулируются цели и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность научного исследования, достоверность полученных результатов, указывается научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения о структуре и объеме диссертации, а также апробация результатов исследования.

В первой главе приведен обзор современной литературы, посвященный квантовой сенсорики на основе спиновых центров в широкозонных полупроводниках. Рассмотрены принципы работы квантовых магнитометров, основные типы спиновых центров в алмазе (NV-центры) и карбиде кремния (V_{Si} , дивакансии, ванадий), их оптические и спиновые свойства, методология ЛАС-спектроскопии и применения в магнитометрии.

Вторая глава посвящена методике эксперимента и описанию исследуемых объектов. Основная часть оптических измерений выполнена на базе двух ОДМР сканирующих конфокальных микроскопов НТ-МДТ, модифицированных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Первая установка, оснащенная лазером с длиной волны 785 нм, лавинным фотодиодом и системой трехосевых катушек Гельмгольца, использовалась для полностью оптической спектроскопии антипересечения уровней и векторной магнитометрии на кристаллах 4H-SiC. Вторая установка с лазером 532 нм, монохроматором и ПЗС-камерой была совмещена с атомно-силовым микроскопом и применялась для регистрации спектров ОДМР и комбинационного рассеяния света, а также для прецизионного манипулирования одиночными наночастицами при изготовлении сканирующих квантовых зондов. Подвод

микроволнового излучения к образцу осуществлялся с помощью планарной СВЧ-антенны. В работе изучались монокристаллы $4H\text{-SiC}$ с V2-центрами, полученными облучением электронами, наночастицы $6H\text{-SiC}$, приготовленные механохимическим измельчением с последующим облучением ионами геля, а также монокристаллы алмаза с NV-центрами, синтезированные методом HPHT-спекания детонационных наноалмазов.

Третья глава посвящена экспериментальному наблюдению и интерпретации спектров антипересечения спиновых уровней V2-центра в кристаллах $4H\text{-SiC}$ с природным содержанием изотопов при комнатной температуре. Спектры LAC регистрировались по изменению интенсивности фотолюминесценции при сканировании магнитного поля, приложенного вдоль кристаллографической оси c кристалла, с использованием синхронного детектирования при модуляции на низкой частоте магнитного поля и модуляции интенсивности возбуждающего лазера. В диапазоне полей от 0 до 4 мТл были зарегистрированы резонансы, включающих как чисто электронные антипересечения, так и спутанные линии, обусловленные сверхтонким взаимодействием.

Для интерпретации наблюдаемой картины использовался спиновый гамильтониан, включающий зеемановский член, член тонкой структуры D с аксиальной симметрией и сверхтонкое взаимодействие A с ядрами ^{29}Si ($I = 1/2$), расположенными во второй координационной сфере относительно вакансии кремния:

$$\hat{H} = g\mu_B \vec{B} \cdot \hat{S} + D \left(\hat{S}_z^2 - \frac{1}{3} S(S+1) \right) + A \hat{I} \cdot \hat{S} \quad (1)$$

Параметр тонкой структуры $D = 35$ МГц ($2D = 70$ МГц) задает масштаб расщеплений в нулевом поле и определяет положения двух основных антипересечений LAC1 и LAC2, соответствующих изменению проекции электронного спина на $\Delta m_S = \pm 2$ и $\Delta m_S = \pm 1$. Численное моделирование энергетических уровней, выполненное с помощью пакетов VISUAL EPR [25] и EasySpin [26], показало, что в отсутствие ядерного спина система уровней содержит всего две точки LAC, тогда как учет сверхтонкого взаимодействия с одним ядром ^{29}Si приводит к появлению дополнительных антипересечений, полностью соответствующих экспериментально наблюдаемым спутанным линиям. На рис. 1 представлены экспериментальные спектры LAC, зарегистрированные при модуляции магнитного поля и лазерного возбуждения, и соответствующие диаграммы энергетических уровней с указанием всех идентифицированных точек антипересечения.

Сопоставление LAC-спектроскопии с традиционным электронным парамагнитным резонансом выявило принципиальные различия в наборах наблюдаемых переходов. В то время как сигналы ЭПР определяются ненулевыми матричными элементами резонансного

микроволнового поля, в ЛАС-спектрах смешивание спиновых волновых функций происходит под действием статических возмущений, что делает видимыми даже те переходы, которые запрещены в стандартном ЭПР. Наиболее ярко это различие проявляется для системы с $I = 0$, где LAC1, соответствующий переходу с $\Delta m_S = \pm 2$, не имеет аналога в спектре ЭПР, но отчетливо наблюдается оптически.

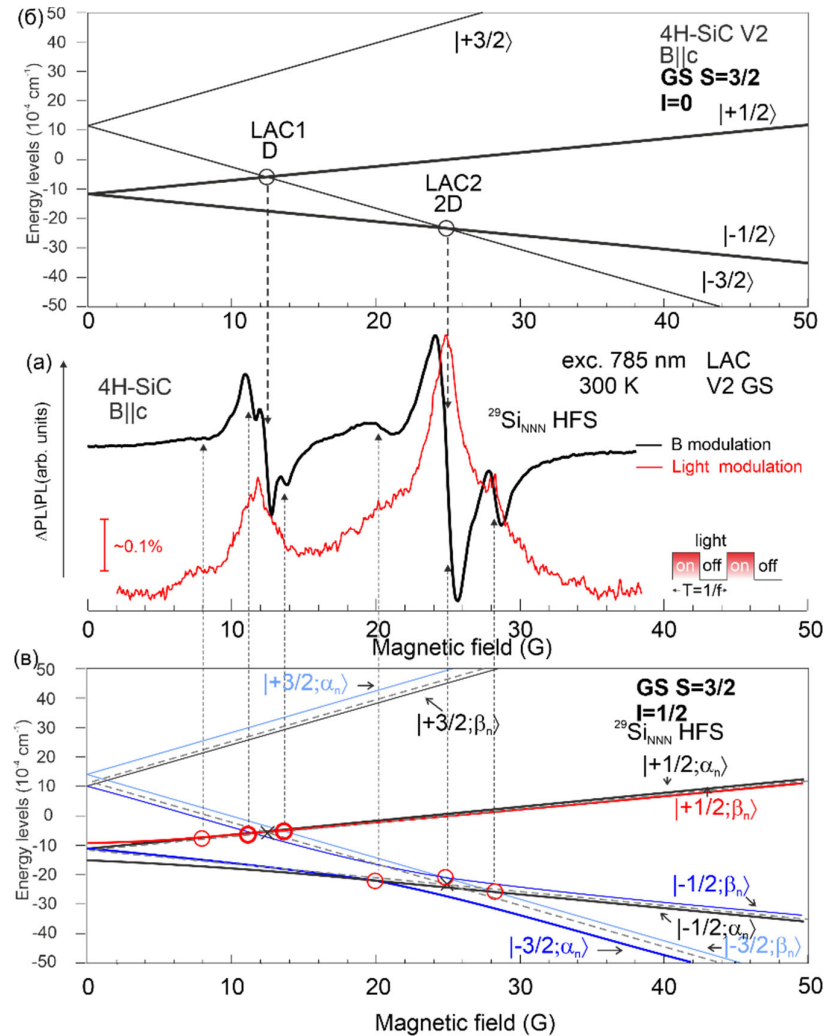


Рисунок 1 — а) Спектр ЛАС спиновых центров в 4H-SiC, зарегистрированный при модуляции магнитного поля (черная кривая) и при модуляции возбуждающего излучения (красная кривая). б) Схемы энергетических уровней для основного состояния и (в) с учетом сверхтонкого взаимодействия с ядром ^{29}Si . Кругами и крестиками отмечены точки ЛАС

Детальный анализ волновых функций в области антипересечений показал, что состояния системы представляют собой линейные комбинации базисных векторов $|M_S, m_I\rangle$, причем коэффициенты разложения существенно изменяются при прохождении через точки антипересечений. В нулевом магнитном поле волновые функции образованы суперпозицией двух состояний с примерно равными весами, тогда как в сильном поле каждая функция

практически полностью соответствует одному чистому состоянию с примесью менее одного процента. На рис. 2 приведено сравнение экспериментального спектра LAC с результатами численного моделирования спектров ЭПР для частоты 100 кГц, демонстрирующее значительное различие в числе и положениях резонансных линий.

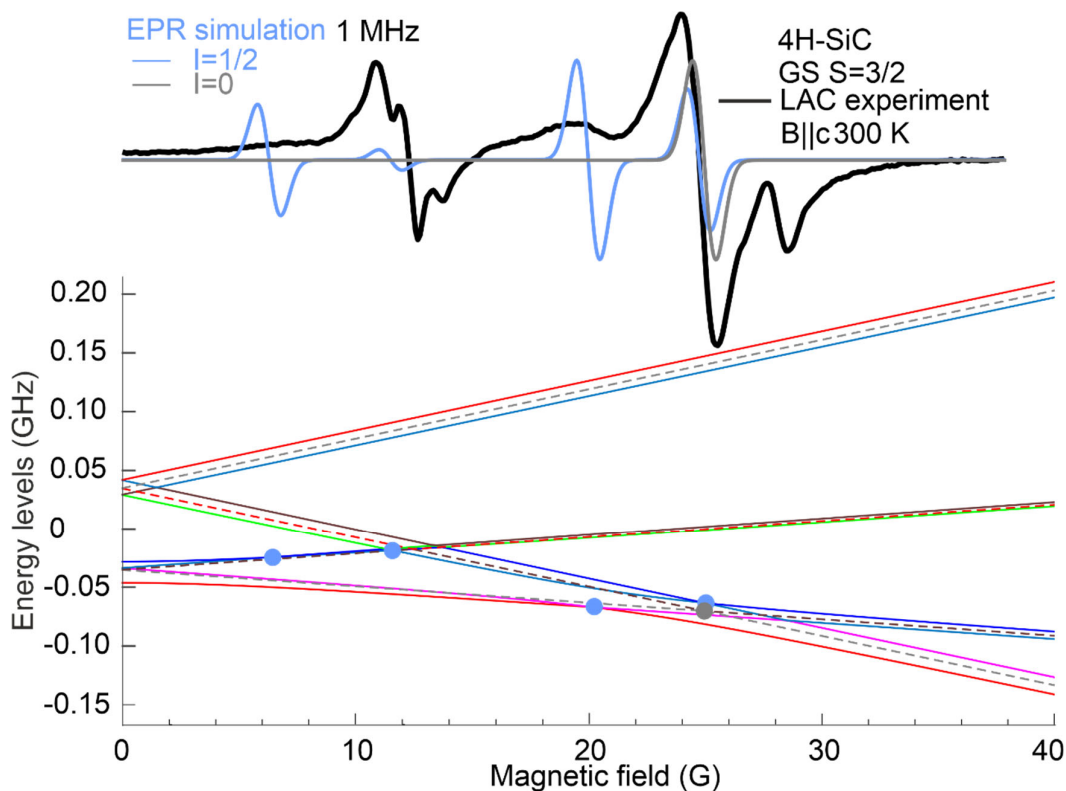


Рисунок 2 — Экспериментальный спектр LAC в кристалле 4H-SiC с природным содержанием изотопов и симуляция спектров ЭПР. Внизу показана система энергетических уровней, рассчитанная для $S = 3/2$, сплошные линии для $I = 1/2$, пунктир для $I = 0$. Кружками указаны точки ЭПР переходов для частот 100 кГц, вверху показаны соответствующие симулированные линии ЭПР для этих переходов

Обнаруженная в экспериментах возможность регистрации эффекта LAC при импульсном оптическом возбуждении открывает путь к изучению динамики спиновой поляризации в субмиллисекундном временном диапазоне. Изменения интенсивности фотолюминесценции в областях антипересечений, сопровождающиеся как переворотом ядерного спина, так и без него, позволяют судить о степени поляризации ядерных спинов и потенциально дают инструмент для полностью оптического манипулирования ядерной спиновой системой. Проведенные исследования закладывают основу для полностью оптической спектроскопии сверхтонких взаимодействий в широком классе квартетных центров других политипов карбида кремния. Полученные результаты не только углубляют

фундаментальное понимание природы спиновых центров в SiC, но и открывают перспективы для разработки новых методов векторной магнитометрии.

Четвертая глава посвящена разработке и экспериментальной реализации метода полностью оптической векторной магнитометрии на основе спектроскопии антипересечения уровней. Фундаментальным основанием предложенного подхода служит обнаруженная высокая чувствительность формы спектра антипересечения уровней не только к величине, но и к пространственной ориентации внешнего магнитного поля. При отклонении вектора поля от аксиальной оси центра V2 на несколько градусов происходит резкое перераспределение относительных интенсивностей сателлитных линий, связанных со сверхтонким взаимодействием, что однозначно указывает на появление поперечной компоненты магнитного поля. Физический механизм такой чувствительности заключается в появлении недиагональных членов в зеемановской части спинового гамильтониана, ответственных за смешивание базисных состояний с различными проекциями спина, причем степень этого смешивания напрямую зависит от величины и направления поперечного поля. Систематическое исследование ориентационных зависимостей было выполнено путем вращения кристалла в квазистационарном магнитном поле с синхронной регистрацией спектров LAC, результаты которого в сопоставлении с численным моделированием энергетических уровней для различных углов между полем и осью c представлены на рис. 3.

Принцип векторной магнитометрии основан на процедуре последовательной компенсации всех компонент измеряемого поля до полного совпадения регистрируемого спектра с эталонным, полученным в условиях, когда внешнее поле в области образца пренебрежимо мало. Первый этап процедуры заключается в определении продольной компоненты B_z , величина которой жестко связана с линейным сдвигом положений основных резонансов LAC1 и LAC2 вдоль оси магнитного поля. Данный сдвиг определяется исключительно проекцией поля на ось c кристалла и совершенно не зависит от поперечных составляющих, что позволяет измерить продольную компоненту еще до начала компенсации поперечных. После компенсации найденного значения B_z из регистрируемого поля положение и интенсивность резонансных линий возвращается к эталонному, однако форма спектра остается искаженной из-за присутствия некомпенсированных поперечных компонент B_x и B_y .

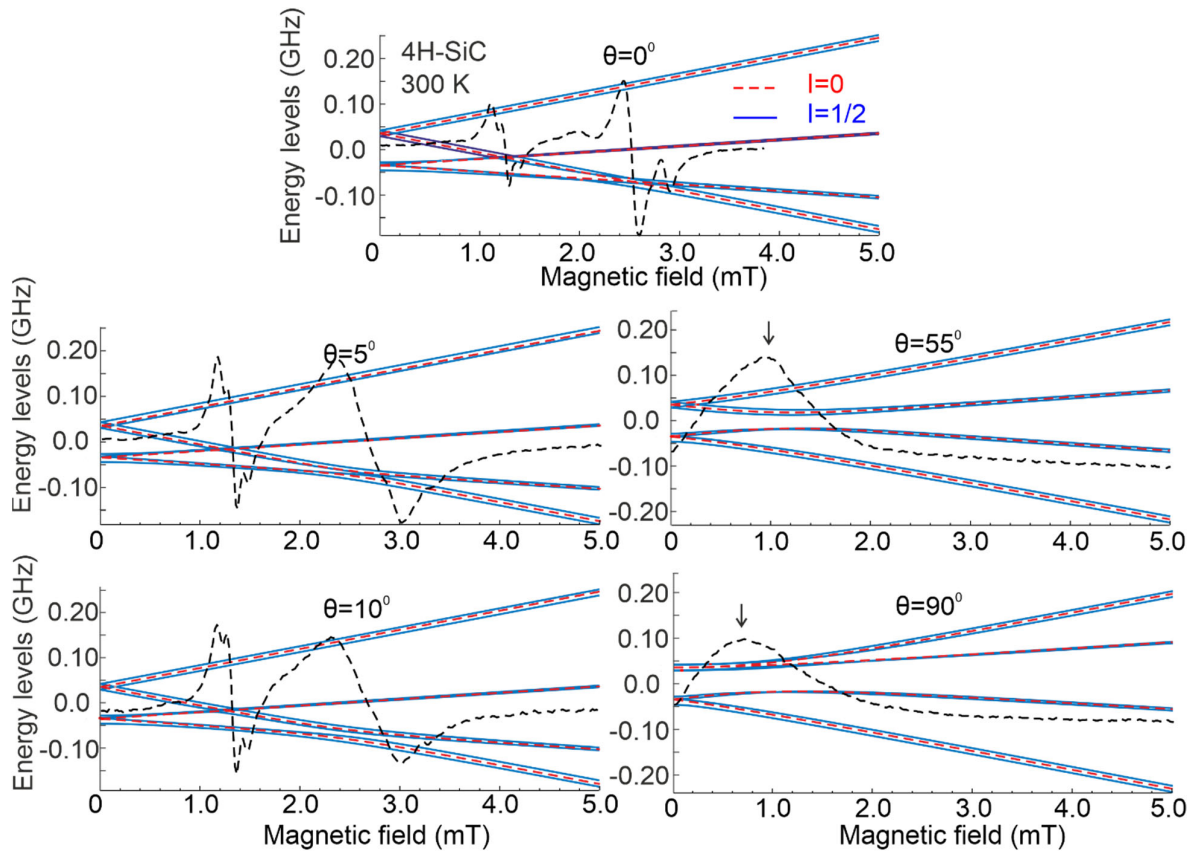


Рисунок 3 — Уровни энергии для центра V2 со спином $S = 3/2$ в 4H-SiC, рассчитанные для различных ориентаций кристалла в магнитном поле. Сплошные линии соответствуют структуре спинового центра, в которой имеется сверхтонкое взаимодействие с одним ядром ^{29}Si (Si_{NNN}), $I = 1/2$; пунктирные линии соответствуют структуре, в которой сверхтонкое взаимодействие отсутствует, $I = 0$. Пунктирными черными линиями показаны соответствующие спектры LAC.

Для измерения величины этих компонент была разработана система эмпирических критериев, основанная на анализе поведения интенсивностей отдельных резонансных линий в зависимости от величины поперечного поля. Калибровочные зависимости, полученные путем приложения точно известных полей вдоль лабораторной оси x и регистрации соответствующих спектров, приведены на рис. 4. Рис 4,а демонстрирует эволюцию формы спектра при последовательном увеличении B_x ; рис 4,б демонстрирует полученные из этих спектров зависимости абсолютных интенсивностей ключевых линий и их отношений. Первый критерий опирается на наблюдение линии 4, которая полностью исчезает из спектра при достижении поперечной компонентой значения 0,15 мТл, что объясняется подавлением соответствующего канала сверхтонкого смешивания состояний при увеличении неаксиальной составляющей поля. Второй критерий использует отношение амплитуд линий 5 и 2, которое обращается в единицу при $B_{\perp} = 0,28$ мТл, что является удобной реперной точкой для оценки величины поля. Третий критерий связан с моментом слияния интенсивности линий 5 и 6, наступающим при $B_{\perp} = 0,4$ мТл, когда две линии

перестают разрешаться из-за уширения, а четвертый критерий фиксирует полное исчезновение сателлитной структуры первого антипересечения LAC1 при поперечных полях, превышающих 0,6 мТл. Совокупность этих критериев позволяет оперативно, без регистрации полного спектра, оценить величину поперечной компоненты с точностью, достаточной для перехода к процедуре точной компенсации.

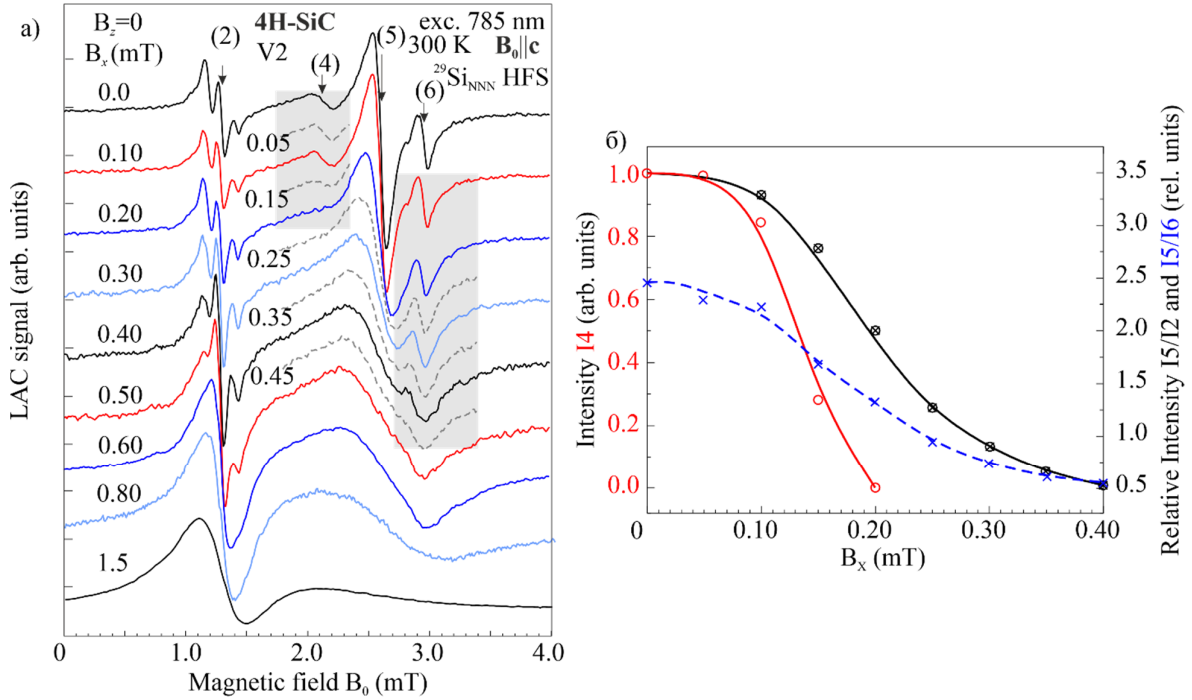


Рисунок 4 — (а) Изменение формы спектров LAC при варьировании перпендикулярной компоненты B_x . (б) Калибровочные зависимости интенсивности резонансной линии I4 и отношений амплитуды резонансных линий (I5/I2) и (I5/I6), используемые для количественной оценки B_x

Компенсация поперечного поля осуществляется путем регулировки токов в катушках Гельмгольца, создающих поля вдоль осей x и y , при непрерывном наблюдении за формой спектра LAC. Критерием полной компенсации служит совпадение наблюдаемого спектра с эталонным, полученным в нулевом поле. Процесс компенсации для одного из конкретных измерений показан на рис. 5, где последовательно представлены эталонный спектр, спектр после внесения измеряемого поля, результат компенсации только продольной компоненты (восстановление положения линий при сохраняющейся искаженной форме) и окончательный спектр после компенсации всех трех компонент, практически неотличимый от эталонного. Вектор измеряемого поля при этом определяется как $\mathbf{B}_{\text{Meas}} = -\mathbf{B}_{\text{Comp}}$, где $\mathbf{B}_{\text{Comp}}$ — магнитное поле, создаваемое катушками, при котором достигнута компенсация, а его модуль и углы вычисляются по стандартным формулам векторной алгебры. Экспериментальная апробация метода на модельном поле, создаваемом

постоянным магнитом, расположенным в произвольной точке относительно сенсора, показала возможность полного восстановления вектора с полярным и азимутальным углами, вычисляемыми с точностью до десятых долей градуса.

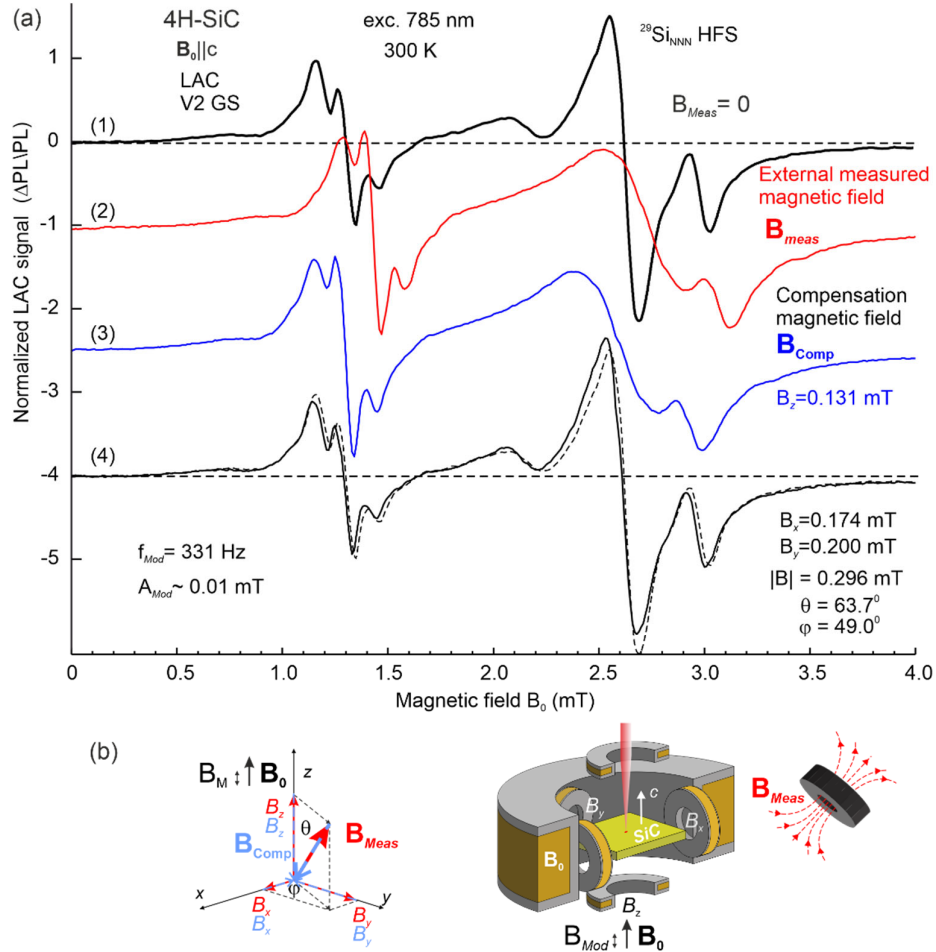


Рисунок 5 — Принцип полностью оптической векторной магнитометрии методом компенсации внешнего магнитного поля. (a) — Изменение спектров LAC в процессе компенсации: (1) эталонный спектр при нулевом внешнем поле; (2) спектр после внесения произвольного измеряемого поля B_{meas} ; (3) результат компенсации продольной компоненты B_z ; (4) окончательный спектр после полной компенсации всех компонент (B_x, B_y), совпадающий с эталонным. (b) — Схематическое представление компенсации: измеряемое поле B_{Meas} (красные стрелки) компенсируемое полем B_{Comp} (синие стрелки)

Развитием компенсационного подхода стал ускоренный метод с использованием модифицирующих полей, призванный обеспечить определенное, заранее известное время измерения. После того как продольная компонента скомпенсирована, а модуль поперечной составляющей $|B_\perp|$ определен по калибровочным зависимостям, к системе последовательно прикладываются калиброванные B^{mod} вдоль лабораторных осей x и y , амплитуда которых в точности равна найденному модулю ($|B_\perp| = |B^{mod}| = B_x^{mod} = B_y^{mod}$). Приложение поля

вдоль оси x приводит к векторному сложению с неизвестной поперечной компонентой, и по изменению формы спектра определяется модуль результирующего вектора $|\mathbf{B}_1|$, после чего аналогичная процедура повторяется для оси y , позволяя определить $|\mathbf{B}_2|$. Три измеренные величины $|\mathbf{B}_\perp|$, $|\mathbf{B}_1|$ и $|\mathbf{B}_2|$ позволяют из геометрических соображений аналитически вычислить проекции B_x и B_y , причем правильность вычислений проверяется подачей на катушки компенсирующего поля, которое возвращает спектр к эталонному виду. Именно такая заключительная верификация, продемонстрировавшая полное совпадение спектра после компенсации с реперным, подтвердила корректность всего цикла измерений и надежность предложенного ускоренного метода.

Экспериментальная оценка предельной чувствительности магнитометра проводилась в режиме синхронного детектирования, когда квазистатическое поле B_0 фиксировалось в точке максимальной крутизны резонансной линии LAC2, а дополнительное поле вдоль оси z изменялось с малым шагом при времени интегрирования 0,1 с. Изменение продольной компоненты на 0,3 мкТл разрешается с отношением сигнал/шум порядка единицы, что с учетом полосы пропускания измерительного тракта соответствует чувствительности $\eta_{B_z} = 100 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$. Для поперечной компоненты чувствительность определялась по минимально различимому изменению интенсивности спутниковой линии, которое составило 9 мкТл, а также по изменению отношений амплитуд спутниковых линий, давшее разрешение порядка 30 мкТл. Таким образом, достигнутая чувствительность по поперечной компоненте лежит в диапазоне единиц–десятков мкТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что в сочетании с возможностью субмикронного пространственного разрешения и полным отсутствием СВЧ-излучения делает разработанный метод перспективным для задач картирования магнитных полей в микроэлектронике, исследования биофизических объектов и создания компактных датчиков, работающих при комнатной температуре [27].

Пятая глава посвящена разработке технологии создания сканирующих квантовых зондов на основе наночастиц 6H-SiC с вакансионными центрами V_{Si} и микрокристаллов алмаза с NV-центрами, интегрированных с кантилеверами коммерческого атомно-силового микроскопа (АСМ).

Универсальная воспроизводимая методика прецизионной интеграции одиночных нано- и микрочастиц широкозонных полупроводников с зондами АСМ, представленная в данной работе, базируется на последовательном выполнении технологических этапов, схематически показанных на рис. 6. Полный маршрут изготовления функционального зонда начинается с приготовления монокристаллических наночастиц 6H-SiC. Ключевые

этапы включают: измельчение исходных субмиллиметровых фрагментов (рис. 6,а), формирование коллоидного раствора с контролируемым распределением частиц по размерам (рис. 6,б), осаждение наночастиц на кремниевую подложку (рис. 6,в) и последующее создание в них вакансионных центров V_{Si} методом облучения ионами гелия (рис. 6,г). Финальной стадией является прецизионный захват одиночного нанокристалла на острие коммерческого АСМ-зонда, предварительно смоченного в клее (рис. 6,д), с последующей верификацией результата методами электронной микроскопии (рис. 6,е).

Физическую основу метода захвата частиц составляет баланс капиллярных сил и вязкого трения: на основе анализа этих сил обоснованы оптимальные параметры захвата (сила прижима 200 – 700 нН). Для создания зондов использовался УФ-адгезив, полимеризуемый направленным засветом, что позволило обеспечить воспроизводимую механическую фиксацию нано- и микрокристаллов.

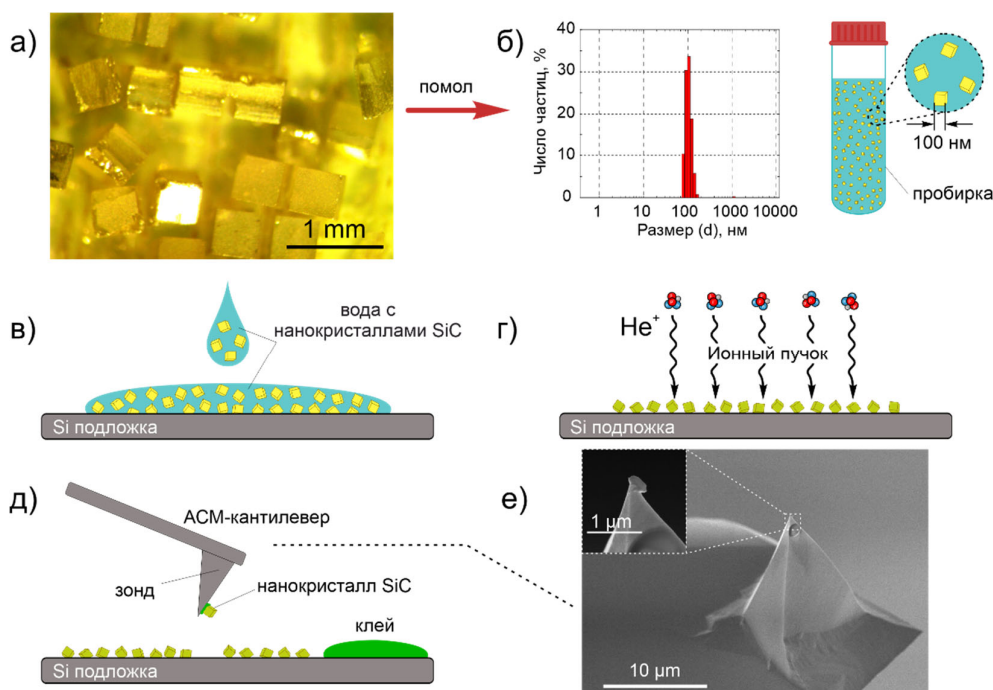


Рисунок 6 — Технологическая схема получения наночастиц $6H$ -SiC и маршрут изготовления сканирующего зонда: а) фотография субмиллиметровых фрагментов монокристаллической пластины $6H$ -SiC, приготовленных для размола; б) распределение наночастиц по гидродинамическим диаметрам, измеренное методом динамического светорассеяния; в) схема осаждения коллоидных частиц на кремниевую подложку; г) процесс создания вакансионных центров V_{Si} методом облучения ионами He^+ ; д) захват одиночного нанокристалла $6H$ -SiC на острие коммерческого кантилевера, предварительно смоченного адгезивом UV50; е) РЭМ-изображение модифицированного зонда с закрепленной наночастицей

Для изготовления зондов на основе микрокристаллов с NV-центрами использовались микрокристаллы, полученные путем спекания детонационных наноалмазов — SDND. В микрокристаллах SDND NV-центры образовывались без

облучения. Комплексная характеристика изготовленных гибридных зондов АСМ проводилась методами конфокальной спектроскопии ФЛ и КРС, а также ОДМР. Результаты характеристики подтвердили сохранение кристаллической структуры и функциональности спиновых центров после интеграции частицы с зондом: ширина линий ФЛ, контраст сигнала ОДМР и параметр внутренних механических напряжений кристаллической решётки $2E = 12,2 \pm 0,2$ МГц для микрокристаллов SDND остались в пределах характеристик исходных частиц. Значение $2E$ существенно ниже, чем у синтетических алмазов, выращенных каталитическим методом (около 16,2 МГц), и близко к характеристикам природного алмаза (около 8,8 МГц) [28], что свидетельствует о низком уровне решёточных деформаций и потенциально более высокой спиновой когерентности, что является ключевым параметром для прецизионной магнитометрии.

Тестовые измерения магнитного резонанса зондами с закреплёнными частицами в известном внешнем магнитном поле подтвердили физическую применимость изготовленных зондов для магнитометрии с субмикронным пространственным разрешением.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы. Решены задачи разработки методов оптической векторной магнитометрии на основе спиновых центров V_{Si} в карбиде кремния и создания сканирующих квантовых сенсоров из нано- и микрочастиц широкозонных полупроводников. Основные результаты и выводы работы состоят в следующем.

1. Методом оптической спектроскопии антипересечения уровней при комнатной температуре систематически исследована структура спектров антипересечения уровней V_2 -центра в кристаллах $4H$ -SiC с природным изотопным составом. В спектрах LAC в диапазоне полей 0 – 3 мТл обнаружены и идентифицированы семь резонансов: два основных антипересечения LAC1 и LAC2, обусловленных тонкой структурой $S = 3/2$, и пять линий, возникающих вследствие сверхтонкого взаимодействия с ядром изотопа ^{29}Si во второй координационной сфере. Соответствие экспериментальных спектров результатам численного моделирования на основе спинового гамильтониана подтверждает правильность предложенной интерпретации.

2. Установлено, что интенсивности спутных линий в спектрах LAC обладают высокой чувствительностью к пространственной ориентации внешнего магнитного поля. Разработан и экспериментально реализован новый метод оптической векторной магнитометрии, не требующий микроволнового излучения. В методе компенсации вектор поля восстанавливается последовательной компенсацией продольной компоненты по

сдвигу линий LAC и поперечных компонент по восстановлению формы спектра. Экспериментально достигнута чувствительность по продольной компоненте $100 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ и по перпендикулярной компоненте лучше $10 \text{ мкТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ при комнатной температуре, что соответствует требованиям задач микро- и наноразмерной магнитометрии.

3. Предложен и апробирован ускоренный метод определения вектора поля с использованием модифицирующих магнитных полей, приложенных последовательно вдоль лабораторных осей x и y . Метод позволяет аналитически вычислить все три проекции поля за фиксированное число измерений без итераций. Корректность метода верифицирована процедурой полной компенсации восстановленного вектора поля.

4. Разработана и реализована универсальная методика создания сканирующих квантовых сенсоров путем прецизионной интеграции одиночных нано- и микрочастиц широкозонных полупроводников с кантилеверами коммерческого АСМ. Технологический маршрут для субмикронных частиц $6H\text{-SiC}$ включает механическое измельчение монокристаллов, приготовление стабильной коллоидной суспензии и создание центров V_{Si} ионного облучения He^+ . Показано, что НРНТ-спекание детонационных наноалмазов без металлических катализаторов обеспечивает синтез алмазных микрокристаллов размером до 15 мкм с высокой концентрацией NV-центров при низком уровне внутренних напряжений ($2E = 12,2 \pm 0,2 \text{ МГц}$).

5. Комплексная характеристика изготовленных гибридных АСМ-зондов методами КРС- и ФЛ-спектроскопии подтвердила сохранение кристаллической структуры и оптической активности спиновых центров после интеграции. Спектры КРС наночастиц $6H\text{-SiC}$, закрепленных на зонде, совпадают со спектрами исходного монокристалла; в спектрах ФЛ алмазных микрокристаллов на зонде наблюдаются характерные БФЛ NV^- при 637 нм . Работоспособность зондов на основе алмазных микрокристаллов подтверждена регистрацией ОДМР-сигнала в известном внешнем поле. Установлено, что для субмикронных частиц $6H\text{-SiC}$ размером менее 500 нм регистрация сигнала LAC на текущем этапе невозможна вследствие недостаточного числа активных центров и уширения линий из-за поверхностных дефектов, что определяет направления дальнейших исследований.

Все полученные в работе результаты являются новыми и направлены на решение актуальных задач квантовой сенсорики. Развитые методы и созданные сенсоры открывают перспективы для применения в диагностике магнитных наноструктур, получения пространственного распределения токов в интегральных схемах и регистрации биоманитных сигналов при комнатной температуре.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

- C1. Лихачев, К. В., Бреев, И. Д., Кидалов, С. В., Баранов, П. Г., Нагалюк, С. С., Анкудинов, А. В., Анисимов, А. Н. Наночастицы 6H-SiC, интегрированные с атомно-силовым микроскопом для сканирующих квантовых сенсоров // Письма ЖЭТФ. – 2022. – Т. 116, № 11. – С. 810-815.
- C2. Likhachev, K. V., Uchaev, M. V., Breev, I. Y. D., Ankudinov, A. V. E., Babunts, R. A., Baranov, P. G., Kidalov, S. V. ODMR active bright sintered detonation nanodiamonds obtained without irradiation // Semiconductors. – 2023. – V. 57, № 2. – P. 101–106.
- C3. Лихачев К.В., Вейшторт И.П., Учаев М.В., Батуева А.В., Яковлева В.В., Гурин А.С., Бабунц Р.А., Баранов П. Г. Полностью оптическая сканирующая спектроскопия антипересечения электронных и ядерных спиновых уровней в кристалле 4H-SiC // Письма ЖЭТФ. – 2024. – Т. 119, № 2. – С. 82–88
- C4. Likhachev K.V., Uchaev M.V., Veyshtort I.P., Batueva A.V., Gurin A.S., Babunts R.A., Baranov P.G. All-optical vector magnetometry based on fine and hyperfine interactions in spin-3/2 centers in silicon carbide // J. Appl. Phys. – 2025. – V. 137, № 1.
- C5. Лихачев К.В., Учаев М.В., Логинова М.М., Вейшторт И.П., Бундакова А.П., Музафарова М.В., Гурин А.С., Бабунц Р.А., Баранов П. Г. Метод полностью оптической векторной магнитометрии по спектроскопии антипересечений уровней спиновых центров в 4H-SiC // Письма ЖЭТФ. – Т. 122, № 5. – С. 306–313
- C6. Лихачев К.В., Скоморохов А.М., Учаев М.В., Успенская Ю.А., Козловский В.В., Левинштейн М.Е., Елисеев И.А., Смирнов А.Н., Крамущенко Д.Д., Бабунц Р.А., Баранов П.Г. Локальная диагностика спиновых дефектов в облученных SiC-диодах Шоттки // Письма ЖЭТФ. – 2024. – Т. 120, № 5. – С. 367–373
- П1. Пат. 2829068 Российская Федерация. Способ оптического измерения векторного магнитного поля // Р.А. Бабунц, П.Г. Баранов, К.В. Лихачев, М.В. Учаев, А.В. Батуева, А.П. Бундакова, М.В. Музафарова. – № 2024113880; заявл. 21.05.2024; опубл. 23.10.2024.
- П2. Пат. 2830140 Российская Федерация. Способ оптического измерения векторного магнитного поля // Гурин А.С., Вейшторт И.П., Лихачев К.В., Музафарова М.В., Бундакова А.П., Бабунц Р.А., Баранов П.Г. – № 2024115240; заявл. 03.06.2024; опубл. 13.11.2024.

Список цитируемой литературы

1. Körber R. и др. SQUIDS in biomagnetism: A roadmap towards improved healthcare // Superconductor Science and Technology. 2016. Т. 29, № 11. С. 113001.
2. Drung D. и др. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2007. Т. 17, № 2.
3. Fagaly R. L. Superconducting quantum interference device instruments and applications //

- Review of Scientific Instruments. 2006. T. 77, № 10.
4. Clarke J., Braginski A. I. The SQUID Handbook // The SQUID Handbook. 2005. T. 1.
 5. Zotev V. S. и др. Multi-channel SQUID system for MEG and ultra-low-field MRI // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2007. T. 17, № 2.
 6. Dang H. B., Maloof A. C., Romalis M. V. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer // Appl. Phys. Lett. 2010. T. 97, № 15.
 7. Kominis I. K. и др. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer // Nature. 2003. T. 422, № 6932.
 8. Shah V. K., Wakai R. T. A compact, high performance atomic magnetometer for biomedical applications // Phys. Med. Biol. 2013. T. 58, № 22.
 9. Schröder T. и др. Quantum nanophotonics in diamond Invited // J. Opt. Soc. Am. B. Optica Publishing Group, 2016. T. 33, № 4. C. B65–B83.
 10. Doherty M. W. и др. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond // Physics Reports. 2013. T. 528, № 1.
 11. Rondin L. и др. Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond // Reports on Progress in Physics. 2014. T. 77, № 5.
 12. Maletinsky P. и др. A robust scanning diamond sensor for nanoscale imaging with single nitrogen-vacancy centres // Nat. Nanotechnol. 2012. T. 7, № 5.
 13. Balasubramanian G. и др. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions // Nature. 2008. T. 455, № 7213.
 14. Maze J. R. и др. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond // Nature. 2008. T. 455, № 7213.
 15. Degen C. L. Scanning magnetic field microscope with a diamond single-spin sensor // Appl. Phys. Lett. 2008. T. 92, № 24.
 16. Barry J. F. и др. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry // Rev. Mod. Phys. 2020. T. 92, № 1.
 17. Casady J. B., Johnson R. W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: A review // Solid-State Electronics. 1996. T. 39, № 10.
 18. Pensl G., Choyke W. J. Electrical and optical characterization of SiC // Phys. B Phys. Condens. Matter. 1993. T. 185, № 1–4.
 19. Sörman E. и др. Silicon vacancy related defect in 4H and 6H SiC // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 2000. T. 61, № 4.
 20. Orlinski S. B. и др. Silicon and carbon vacancies in neutron-irradiated SiC: A high-field

- electron paramagnetic resonance study // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 2003. T. 67, № 12.
21. Baranov P. G. и др. Silicon vacancy in SiC as a promising quantum system for single-defect and single-photon spectroscopy // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 2011. T. 83, № 12.
 22. Simin D. и др. All-optical dc nanotesla magnetometry using silicon vacancy fine structure in isotopically purified silicon carbide // Phys. Rev. X. 2016. T. 6, № 3.
 23. Soltamov V. A. и др. Electron nuclear interactions in spin-3/2 color centers in silicon carbide: A high-field pulse EPR and ENDOR study // Phys. Rev. B. 2021. T. 104, № 12.
 24. Sosnovsky D. V., Ivanov K. L. Level-crossing induced spin phenomena in SiC: A theoretical study // Phys. Rev. B. 2021. T. 103, № 1.
 25. Grachev V. G. Correct expression for the generalized spin Hamiltonian for a noncubic paramagnetic center // Sov. J. Exp. Theor. Phys. 1987. T. 65, № 5. С. 1029.
 26. Stoll S., Schweiger A. EasySpin, a comprehensive software package for spectral simulation and analysis in EPR // J. Magn. Reson. 2006. T. 178, № 1.
 27. Kraus H. и др. Magnetic field and temperature sensing with atomic-scale spin defects in silicon carbide // Sci. Rep. Nature Publishing Group, 2014. T. 4.
 28. Babunts R. A. и др. Diagnostics Methods of Local Stresses/Strains in Diamond at Room Temperature Based on Optically Detected Magnetic Resonance of NV Defects // Tech. Phys. Lett. 2023. T. 49, № 12.