

на правах рукописи

АНИСИМОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

Магнито-оптическая резонансная спектроскопия и микроскопия спиновых центров окраски в карбиде кремния, перспективных для создания квантовых сенсоров магнитного поля и температуры

01.04.07 - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2018

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

Научный руководитель:

Баранов Павел Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лаб. микроволновой спектроскопии кристаллов, ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Голубок Александр Олегович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, профессор физико-технического ф-та Университета ИТМО

Власов Игорь Иванович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией углеродной нанофотоники ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 28 февраля 2019 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.205.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе, и на сайте www.ioffe.ru.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 002.205.01.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

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

А.А. Петров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Уникальные квантовые свойства азотно-вакансионных центров окраски (NV) в алмазе [1] мотивировали исследования по поиску центров с функциональными квантовыми свойствами в карбиде кремния (SiC) [2-7], которые могут качественно расширить возможности таких систем. Карбид кремния берет на себя новую роль гибкой и практичной платформы для использования в современных квантовых технологиях. Центры окраски атомных размеров в объемном и нанокристаллическом SiC являются перспективными системами для спинтроники, фотоники совместимой с волоконной оптикой, квантовой обработки информации и зондирования в условиях окружающей среды. Возможности высокотемпературных оптических спиновых манипуляций, как на спиновых ансамблях [2,3], так и на одиночных спинах [4,7], открыли новую эру в применении спиновых явлений, как в фундаментальной науке, так и в прикладных исследованиях. Было показано, что в SiC имеется, по крайней мере, два семейства центров окраски с $S = 1$ и $S = 3/2$ со структурой в виде комбинаций вакансий кремния и углерода, которые обладают свойством оптического выстраивания населенностей спиновых уровней и позволяют манипулировать спином при комнатных температурах. Изготовление различных типов микроструктур и наноструктур SiC с центрами окраски все больше привлекает внимание благодаря своим применениям в электронных и фотонных устройствах. Успешное использование метаматериалов с центрами NV дает основание предлагать аналогичную комбинацию для центров окраски в SiC, излучение которых простирается до ближнего инфракрасного диапазона 800-1600 нм, что является областью прозрачности для волоконной оптики и живых систем.

В мире проводятся активные исследования по улучшению чувствительности сенсоров на основе спиновых центров окраски в алмазах и карбиде кремния, применению различных квантовых систем на их основе в качестве кубитов и кудитов, работающих в условиях окружающей среды. Предполагается использование центров окраски в карбиде кремния для создания на их основе: когерентных усилителей/генераторов СВЧ (мазеров), необходимых для систем дальней космической связи, повышения чувствительности современной магнитно-резонансной томографии; источников одиночных фотонов в видимом и ближнем ИК диапазонах; разработки сенсоров для биологических и метрологических применений; пространственного контроля температур на клеточном уровне.

Для выполнения упомянутых исследований необходимо уникальное для современной радиоспектроскопии оборудование. Оно должно объединять методы, позволяющие осуществлять спиновые манипуляции с субмикронным пространственным разрешением. Комбинирование методов атомно-силовой микроскопии и конфокальной оптической микроскопии с методами магнитного резонанса позволяет получить высокое пространственное разрешение и проводить регистрацию магнитных резонансов в субмикронных объемах карбида кремния или алмаза.

Цель диссертационной работы

Создание спиновых центров окраски в карбиде кремния, обладающих свойством оптического выстраивания населенностей спиновых уровней в широком диапазоне температур, и их исследование методами магнитно-резонансной оптической спектроскопии для разработки квантовых сенсоров магнитного поля и температуры на их основе.

Основные задачи

1. Разработка и изготовление сканирующего спектрометра магнитного резонанса на основе комбинации конфокального и атомно-силового микроскопов для экспериментальных исследований спиновых центров окраски методами оптического детектирования магнитных резонансов по изменению интенсивности фотолюминесценции.
2. Введение в карбид кремния гексагональных и ромбических политипов (4H, 6H, 15R) спиновых центров окраски, обладающих свойством оптического выстраивания населенностей спиновых уровней в широком диапазоне температур и эффективной фотолюминесценцией в ближней ИК области спектра (850-950 нм) с высоким квантовым выходом.
3. Осуществление оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) на спиновых центрах окраски путем резонансного воздействия радиочастотным излучением на эти центры в широком интервале температур, включая комнатные, с высокой чувствительностью, вплоть до регистрации счетного количества спинов.
4. Обнаружение и демонстрация эффекта "выжигания узких провалов" в неоднородно уширенных линиях ОДМР спиновых центров окраски в разных политипах карбида кремния при воздействии резонансного радиочастотного излучения на двух частотах, осуществление спиновых манипуляций с выбранными спиновыми пакетами.

5. Наблюдение оптического отклика в магнитных полях, соответствующих антипересечению зеемановских спиновых уровней основного и возбужденного состояний центров окраски со спином $S=3/2$ в карбиде кремния в широком диапазоне температур, включая комнатные и выше, что позволяет реализовать полностью оптические квантовые сенсоры магнитных полей и температур с субмикронным пространственным разрешением.
6. Регистрация эффектов кросс-релаксации (КР) по оптическому каналу между спиновыми уровнями центров окраски с $S=3/2$, в которых происходит оптически индуцированное выстраивание спиновых уровней, и центрами окраски с $S=1$, в которых имеется Больцмановское распределение населенностей спиновых уровней, что позволяет реализовать полностью оптические квантовые сенсоры температуры с субмикронным пространственным разрешением, ввиду зависимости положения сигналов кросс-релаксации в магнитном поле от температуры.
7. Исследования эффектов ОДМР и антипересечения уровней (АПУ) для спиновых центров окраски в нанокристаллах карбида кремния и разработка сенсорных устройств с помещением упомянутых нанокристаллов на зонд атомно-силового микроскопа, совмещенного с конфокальным микроскопом.

Научная новизна

1. Создан сканирующий спектрометр магнитного резонанса на основе комбинации конфокального и атомно-силового микроскопов для экспериментальных исследований спиновых центров окраски методами оптического детектирования магнитных резонансов, антипересечения зеемановских спиновых уровней, эффектов кросс-релаксации по изменению интенсивности фотолуминесценции.
2. Обнаружены и исследованы эффекты резкого изменения фотолуминесценции в области антипересечения зеемановских уровней в основном и возбужденном состояниях центров окраски со спином $3/2$ в карбиде кремния.
3. Оптически обнаружен эффект кросс-релаксации спиновых уровней оптически активных центров окраски со спином $3/2$ с центрами окраски в триплетном спиновом состоянии с температурно-зависимым расщеплением тонкой структуры.
4. Обнаружен и исследован эффект "выжигания провалов" в неоднородно-уширенной линии ОДМР центров окраски со спином $S=3/2$ в карбиде кремния разных политипов. Исследованы временные характеристики спин-зависимых рекомбинационных процессов с использованием импульсных методов ОДМР.

5. Разработаны новые оптические принципы работы квантовых сенсоров магнитного поля и температуры на базе спиновых центров окраски со спином $3/2$ в карбиде кремния. Рассчитаны рабочие параметры данных сенсоров. Разработан принцип использования промышленного конфокального микроскопа с атомно-силовым микроскопом для работы квантовых сенсоров на основе спиновых центров в кристаллах и нанокристаллах карбида кремния.

Научная и практическая значимость

1. Спиновые центры окраски атомарных размеров в гексагональных и ромбических политипах карбида кремния (4Н, 6Н, 15R) могут быть использованы в качестве сенсоров магнитного поля и температуры с субмикронным пространственным разрешением.

2. Спиновые центры окраски предполагается использовать в качестве элементной базы для квантовых вычислений. В многочисленных лабораториях в мире ведутся работы по манипулированию одиночными спинами и одиночными фотонами (кубитами) в карбиде кремния в условиях окружающей среды. Сверхтонкие взаимодействия с ядрами кремния Si-29 и углерода C-13, а также эффекты кросс-релаксации, могут быть использованы для осуществления квантовых алгоритмов и когерентного взаимодействия между кубитами.

Положения выносимые на защиту

1 Спиновые центры окраски в гексагональных и ромбических политипах карбида кремния (4Н, 6Н, 15R) обладают люминесценцией в ближней ИК области спектра (850-950 нм) с высоким квантовым выходом, оптическое возбуждение этих центров в широком диапазоне температур, включая комнатные и выше, вызывает выстраивание спинов.

2. Воздействие резонансного радиочастотного излучения приводит к сильному изменению интенсивности фотолюминесценции спиновых центров окраски в широком диапазоне температур, включая комнатные и выше, в результате оптически детектируется магнитный резонанс (ОДМР) с высокой чувствительностью, вплоть до регистрации счетного количества спинов. Воздействие резонансного радиочастотного излучения на двух частотах приводит к "выжиганию узких провалов" в неоднородно уширенной линии ОДМР и дает возможность осуществлять спиновые манипуляции с выбранным спиновым пакетом.

3. В магнитных полях, соответствующих антипересечению спиновых уровней основного состояния центров окраски со спином $S=3/2$ в SiC, регистрируется сильное изменение интенсивности фотолюминесценции этих центров в широком диапазоне температур, включая комнатные и выше, что позволяет реализовать полностью оптические квантовые сенсоры магнитных полей с субмикронным пространственным разрешением.

4. В магнитных полях, соответствующих антипересечению спиновых уровней возбужденного состояния центров окраски со спином $S=3/2$ в SiC, а также в полях, соответствующих кроссрелаксации, регистрируется сильное изменение интенсивности фотолюминесценции этих центров в широком диапазоне температур, включая комнатные и выше, что позволяет реализовать полностью оптические квантовые сенсоры температурных полей с субмикронным пространственным разрешением ввиду сильной зависимости точек антипересечения и кроссрелаксации от температуры.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием самых современных экспериментальных методов: конфокальной спектроскопией, атомно-силовой микроскопией, оптически детектируемым магнитным резонансом. Использованием образцов полученных различными компаниями и лабораториями. Анализом результатов исследований, проведенных в различных экспериментальных условиях, согласованностью с результатами, полученными с помощью других методов и другими научными группами, а также их соответствием теоретическим расчетам, выполненным с помощью специальных компьютерных программ. Описываемые в работе результаты опубликованы в реферируемых научных журналах и были представлены на российских и международных конференциях.

Апробация работы и использование результатов

Основные положения диссертации доложены на конференциях и симпозиумах: 16, 17, 18 Всероссийские молодежные конференции по физике полупроводников опто- и наноэлектронике СПб в 2015, 2016, 2017 годах; Международная конференция Физика.СПб в 2015, 2016, 2017 годах; Ion-Surface Interactions 2015; XX, XXI, XXII симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» в Нижнем Новгороде 2016-2018 годах; «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития» 15-16 ноября 2016; ICDCMT 2016: 18th International Conference on Diamond, Carbon Materials and Technology; 25 and 24th

International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, в 2016 в 2017 годах в Санкт-Петербурге; ICONO/LAT 2016, September 26 – 30, 2016, Minsk, Belarus; ICQOQI’2017, November 20-23, 2017, Minsk, Belarus; HBSM’2018, August 6-12, Suzdal-Moscow, 2018; Низкоразмерный семинар ФТИ им. А.Ф. Иоффе 14 Мая 2018 года; Доклад на семинаре в КФТИ 7 июня 2018; Семинар ЕЗ в ТУ Дортмунда 12.10.2018.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 13 работ [A1-A13], в том числе 13 статей входящих в реферируемые журналы. По результатам работ получено 4 патента РФ.

Личный вклад автора

Участие в постановке задач и планирование экспериментов, объяснение результатов и написание статей. Непосредственно автором проведены измерения и проанализированы полученные результаты методами ОДМР, антипересечения спиновых уровней, кросс-релаксационных резонансов, выжигания провалов в сигналах ОДМР. Осуществлялся контроль исследуемых образцов карбида кремния методами фотолюминесценции и комбинационного рассеяния. Автором собран макет сканирующего спектрометра магнитного резонанса, работающий в различных режимах для проведения измерений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 115 страниц, включая 50 рисунков и 7 таблиц.

Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность научного исследования, указывается научная новизна и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о структуре диссертации, ее объеме и ее апробации.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященный новому направлению в квантовой физике, развитому в последние 20 лет: фундаментальным и прикладным исследованиям спиновых центров окраски в карбиде кремния, изменивших наши представления о возможности спиновых манипуляций в условиях окружающей среды, включая и манипуляции одиночными спинами. В карбиде кремния имеется, по меньшей мере, два семейства центров окраски со спинами $S=1$ и $S=3/2$, которые обладают свойством оптического выстраивания спиновых уровней и позволяют манипулировать спиновыми состояниями при высоких для спиновых систем температурах, достигающих 500 К.

Вторая глава посвящена разработке и созданию новых экспериментальных установок по исследованию магнитного резонанса спиновых центров окраски, на основе совмещенных оптического конфокального микроскопа с атомно-силовым микроскопом, позволяющим изучать низкие концентрации спинов в субмикронных объемах материала.

В разделе 2.1 описаны методы выращивания кристаллов карбида кремния гексагональных (4H, 6H) и ромбических (15R) политипов с низким содержанием азота и рост кристаллов редких политипов. Представлены методы введения в эти кристаллы спиновых центров окраски.

В разделе 2.2 описана схема экспериментальной установки для оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) с субмикронным пространственным разрешением, выполненной на основе спектрометра магнитного резонанса и конфокального микроскопа (схема представлена на Рисунке 1). На вставках представлена имеющаяся информация по оптическому выстраиванию населенностей различных спиновых центров. Серым цветом выделены части установки, которые используются при «выжигании» провалов.

Экспериментальная установка включает в себя лазер накачки, излучающий свет в инфракрасном (ИК) диапазоне, который через разветвитель луча в виде полупрозрачного зеркала и объектива фокусирует лазерный луч на исследуемый кристалл карбида кремния. В объеме, выделяемом лазером, происходит измерение фотолюминесценции (ФЛ) спиновых центров с помощью фотодетектора. Интегральный сигнал ФЛ регистрируется с помощью фотодиода и синхронного детектора. На синхронный детектор подается опорная частота от низкочастотного (НЧ) генератора. Частота низкочастотного генератора может использоваться для модуляции:

- высокочастотного генератора накачки (регистрация ОДМР);
- высокочастотного генератора зондирования (регистрация ОДМР в режиме выжигания провалов);
- магнитного поля (регистрация ОДМР, АПУ, КР).

Подача ВЧ мощности на кристалл карбида кремния индуцирует переходы между уровнями спиновых центров в оптически выделенном объеме. При использовании метода выжигания провалов подается ВЧ мощность от двух ВЧ генераторов: зондирующего ВЧ генератора (частота которого $f(\text{зонд})$ может изменяться в пределах линии оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР)) и от ВЧ генератора накачки с постоянной частотой $f(n)$ (находящейся в пределах линии ОДМР и которая используется для выжигания узких провалов в неоднородно-уширенном сигнале ОДМР).

В экспериментальной установке предусмотрена возможность подачи магнитного поля смещения и развертки. Данная экспериментальная установка изготовлена на базе сканирующего конфокального микроскопа, что позволяет осуществлять возвратно-поступательное перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях под действием управляющих напряжений стола с пьезоэлементом, на котором находится исследуемый образец. Сканирование по третьему направлению осуществляется путем возвратно-поступательного перемещения объектива. Всеми элементами экспериментальной установки управляет контроллер и программно-аппаратный блок управления в виде компьютера со специальным программным обеспечением.

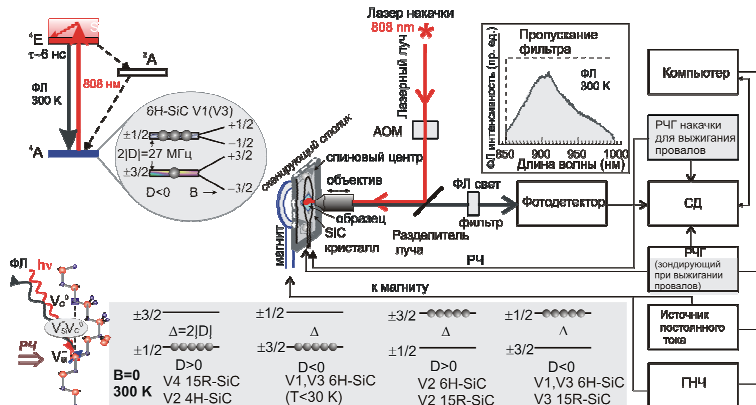


Рисунок 1. Блок-схема зондово-оптического спектрометра магнитного резонанса, выполненного для исследования и примененный спиновых центров окраски в карбиде кремния. Изменения фотолюминесценции (ФЛ) регистрируются при различных схемах включения магнитных и радиочастотных полей. Применяются методы ОДМР, антипересечения уровней, кросс-релаксации, выжигания провалов в ОДМР под действием двух радиочастот (РЧ) и другие. Показаны две модификации использования карбида кремния для регистрации магнитных и температурных полей: в виде пластины кристалла SiC с центрами окраски (обозначенными V1, V2, V3, V4), помещенного на сканирующий столик микроскопа, или в виде нанокристалла SiC, помещенного на зонд АСМ. Внизу показаны населенности спиновых уровней центров окраски, создаваемые оптическим возбуждением.

В третьей главе приводятся результаты исследований методом оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) спиновых центров окраски в SiC.

В разделе 3.1 описаны исследования спиновых центров в различных поли типах SiC методом ОДМР. Зарегистрированы ОДМР сигналы по изменению ФЛ спиновых центров в ближнем ИК-диапазоне при температуре 310 K в кристаллах 6H-SiC и 15R-SiC. Результаты измерений показаны на Рисунке 2. Наблюдаемые сигналы описываются спиновым гамильтонианом:

$$H = g\mu_B S_z B + D[S_z^2 - 1/3S(S + 1)], \quad (1)$$

где B – постоянное магнитное поле, S_z – оператор проекции электронного спина $S = 3/2$ на направление внешнего магнитного поля; $g = 2,002$ – электронный g-фактор; μ_B – магнетон Бора, D - параметр расщепления тонкой структуры спинового центра в аксиальном кристаллическом поле в SiC.

На спектре ОДМР (см. Рисунок 2) мы регистрируем изменение ФЛ спиновых центров V1, V3, V2 в монокристалле 6H-SiC и V2, V4, V3 в монокристалле 15R-SiC при развертке постоянного радиочастотного поля модулированного по амплитуде.

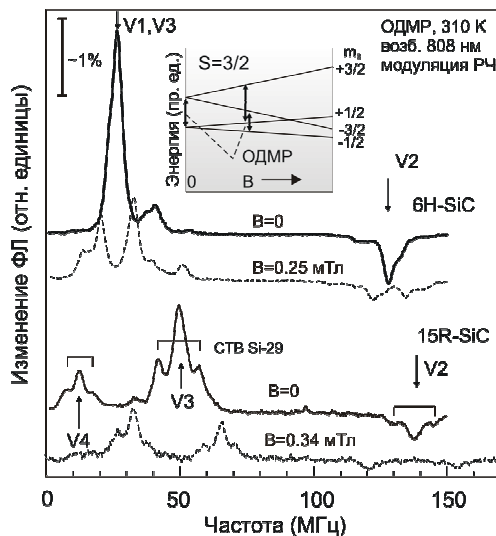


Рисунок 2. Спектры ОДМР спиновых центров окраски в двух поли типах карбида кремния, зарегистрированные при температуре 310 К по изменению фотолуминесценции (ФЛ) под действием радиочастотного (РЧ) поля, модулированного на низкой частоте 330 Гц в нулевом магнитном поле (сплошные линии) и в дополнительном слабом внешнем магнитном поле (пунктирные линии). На вставке показаны энергетические уровни для спинового центра с $S=3/2$ и ОДМР переходы. Видны также спутные линии, обусловленные сверхтонким взаимодействием с 12 атомами кремния в второй координационной сфере, относительно вакансии кремния, входящей в состав спинового центра.

При подаче слабого магнитного поля, направленного вдоль c -оси кристаллов SiC, мы регистрируем эффект Зеемана, описываемый спиновым гамильтонианом (1). На вставке Рисунка 2 приведена схема энергетических уровней спиновых центров с $S=3/2$ для магнитного поля, направленного вдоль аксиальной оси спинового центра, где стрелками обозначены наблюдаемые ОДМР переходы. Важно отметить, что аксиальные оси всех спиновых центров ориентированы вдоль оси c кристалла. В спектре ОДМР мы также наблюдаем линии, связанные со сверхтонким взаимодействием спиновых центров с изотопом Si-29 (ядерный спин $I=1/2$, природное содержание 4,67%), расположенным во второй координационной сфере относительно вакансии кремния (в этой координационной сфере расположено 12 практически эквивалентных атомов кремния).

По экспериментальным данным, полученным с помощью метода ОДМР, вычислены величины расщеплений в нулевом магнитном поле при комнатной температуре для спиновых центров V1, V2, V3 и V4. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расщепление в нулевом магнитном поле $\Delta\nu=2|D|$ при комнатной температуре для семейства спиновых центров окраски V1, V2, V3 и V4 с $S = 3/2$ в кристаллических решетках 6H-SiC и 15R-SiC. Центры окраски обозначены по наименованию безфононных линий ФЛ, соответствующих этим центрам.

Политип	6H-SiC			15R-SiC		
	V1	V2	V3	V2	V3	V4
$\Delta\nu$ (MHz)	27	128	27	139	11	50

В разделе 3.2 описана предложенная в диссертационной работе методика диагностики локального политипного состава с использованием метода ОДМР.

На Рисунке 3 показаны спектры ОДМР, зарегистрированные по изменению интенсивности ФЛ спиновых центров при температуре 310 К в кристалле 15R-SiC. Кристалл имеет форму пластины с плоскостью, перпендикулярной гексагональной оси c , ФЛ возбуждалась сфокусированным лазерным лучом в двух точках, изолированных в сканирующем конфокальном микроскопе с сфокусированным объемом около 1 мкм^3 (вставка на Рисунке 3). В точке 1 видны сигналы ОДМР, характерные только для политипа 15R-SiC, а в точке 2 наряду с этими сигналами видны линии ОДМР для политипа 6H-SiC (см. Таблицу 1). Поскольку спиновые центры окраски имеют атомарные размеры, предложенный метод диагностики позволяет зафиксировать локальную политипную композицию на субмикронном уровне. Дополнительные возможности для увеличения разрешения сигналов ОДМР из разных политипов обнаруживаются при приложении магнитного поля. В этом случае по спектру ОДМР можно также однозначно идентифицировать политип.

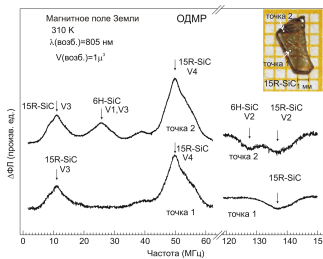


Рисунок 3. Спектры ОДМР, зарегистрированные при изменении интенсивности ФЛ (ΔF_1) спиновых центров при температуре 310 К в кристалле 15R-SiC, в двух точках с конфокальным объемом $\sim 1 \text{ мкм}^3$. На вставке приведено изображение кристалла и указаны точки, в которых проводились измерения. В точке 1 видны только сигналы, принадлежащие спиновым центрам в политипе 15R-SiC, тогда как в точке 2 вместе с сигналами от 15R-SiC наблюдаются линии, присущие спиновым центрам в 6H-SiC.

В разделе 3.3 описаны эффекты выжигания провалов в ОДМР спектрах спиновых центров окраски. На Рисунке 4 (а) приведены результаты выжигания провалов в неоднородно уширенной линии ОДМР в кристалле 15R-SiC при комнатной температуре для двух частот накачки $f(n)$, обозначенных на рисунке; сверху показаны уровни спиновых центров. РЧ накачка на частоте $f(n)$ насыщает спиновый переход $m_s = -1/2 \leftrightarrow m_s = -3/2$ с одним конкретным параметром D . Из-за спиновой релаксации он воздействует на переход $m_s = +1/2 \leftrightarrow m_s = +3/2$ с тем же D . Следовательно, спутник должен появиться при $f(c1) = f(n) + 2\gamma B$, где $\gamma = g\mu_B$ является гиромагнитным отношением (1). Если неоднородное уширение больше зеемановского расщепления, то та же накачка также насыщает переход $m_s = +1/2 \leftrightarrow m_s = +3/2$, но с другим D . Соответственно, он влияет на переход ($m_s = -1/2 \leftrightarrow m_s = -3/2$), а другой спутник появляется при $f(c2) = f(n) - 2\gamma B$. Таким образом, коэффициент для линейной зависимости от магнитного поля равен 2γ , то есть в два раза больше чем у стандартного ОДМР, где соответствующий коэффициент равен γ . На Рисунке 4 (а) видны только высокочастотные спутники, причем расстояние между ними $f(c1) - f(c2) = 4\gamma B$, то есть коэффициент для линейной зависимости от магнитного поля равен 4γ .

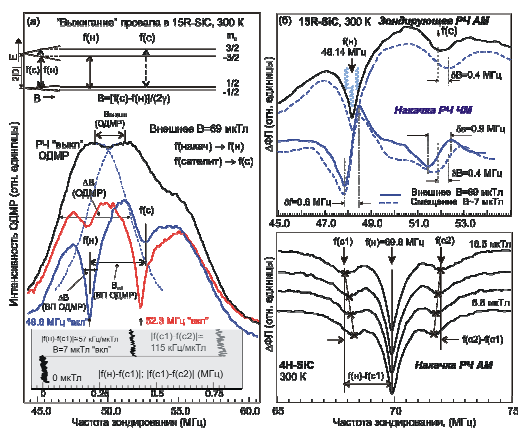


Рисунок 4. (а) Демонстрация выжигания провалов в неоднородно уширенной линии ОДМР в кристалле 15R-SiC при комнатной температуре, сверху показаны уровни спиновых центров, поясняющие принцип выжигания провалов; (вставка) зависимости разности частот провалов при ступенчатом изменении внешнего магнитного поля. (б, верх) Две модуляционные схемы регистрации выжигаемых провалов с модуляцией зондирующей частоты. Пунктиром обозначены измерения при подаче дополнительного поля. (б, низ) Пример третьей модуляционной схемы с модуляцией частоты накачки и регистрацией двух спутников в кристалле 4H-SiC.

На Рисунке 4 (б, верх) показаны в увеличенном масштабе две схемы регистрации по изменению интенсивности ФЛ с применением синхронного детектирования. Первая, при модулировании мощности РЧ зондирования, и вторая, при модуляции частоты РЧ зондирования. Из расчетов магнитного поля получаются, что частота сателлита $f(c)$ соответствует внешнему магнитному полю 69 мкТл. Для обеих схем регистрации показаны спектры, зарегистрированные с подачей дополнительного внешнего магнитного поля 7 мкТл (пунктир). При этом наблюдается сдвиг частоты сателлитов. Частотная модуляция позволяет получить сигнал в виде производной, что упрощает схему регистрации и повышает точность измерений сдвига линии в магнитном поле. На Рисунке 4 (б нижний спектр) приведены измерения, проведенные при 300 К на спиновых центрах V2 в кристалле 4H-SiC с использованием модуляции мощности РЧ накачки. В этом случае видны оба сателлита. На вставке Рисунок 4 (а) представлены зависимости разности частот $|f(n)-f(c1)|$ и $|f(c2)-f(c1)|$, которые используются для определения локального магнитного поля в объеме, возбуждаемом сфокусированным лазерным лучом, при ступенчатом изменении внешнего магнитного поля на 7 мкТл. Чувствительность при определении изменения магнитного поля $\sim 1\text{мкТл}/\sqrt{\text{Гц}}$.

В разделе 3.4 приведено описание управления спинами с помощью выжигания провалов и исследовано влияние мощности накачки на величину провала. Продемонстрирована когерентная спиновая манипуляция при комнатной температуре в кристалле SiC с пониженной концентрацией изотопа Si-29, обладающего ядерным магнитным моментом. Также была продемонстрирована возможность экспериментального возбуждения и считывания спинового состояния в неоднородно уширенных системах. Было показано, что спиновые состояния в SiC характеризуются различными временами релаксации.

В четвертой главе приводятся результаты по обнаружению и исследованию оптическими методами эффектов антипересечения уровней (АПУ) и кросс-релаксационных резонансов в системе спиновых центров окраски в SiC в широком диапазоне температур.

В разделе 4.1 описан механизм АПУ. В отсутствие внешнего магнитного поля, основное состояние центра окраски со спином $S=3/2$ расщепляется на два крамеровских дублета с $m_s = \pm 3/2$ и $m_s = \pm 1/2$ с разницей энергий $\Delta v=2|D|$ (Таблица 1). При приложении внешнего магнитного поля B вдоль оси c , уровни далее

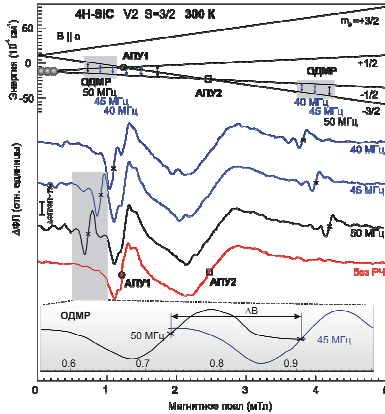


Рисунок 5. Полученные в результате синхронного детектирования при 300 К изменения ФЛ спиновых центров в монокристалле 4H-SiC при приложении постоянного магнитного поля и осциллирующего низкочастотного магнитного поля. Видны сигналы антипересечения (АПУ) спиновых уровней и ОДМР на трех частотах. Вверху показана схема энергетических уровней спиновых центров, сплошными стрелками обозначены наблюдаемые ОДМР переходы. На вставке показан в увеличенном масштабе сдвиг линии ОДМР в магнитном поле для двух частот.

расщепляются, как показано на Рисунке 5. При регистрации ОДМР, резонансное радиочастотное поле индуцирует магнитные дипольные переходы между уровнями с $m_S = \pm 3/2$ и $m_S = \pm 1/2$, что приводит к изменению интенсивности ФЛ. Изменение ФЛ обнаружено нами также в областях АПУ, которые обозначены на Рисунке 5 кружком (АПУ1) и квадратом (АПУ2). Магнитные поля для точек антипересечения уровней $m_S = -3/2$, $m_S = +1/2$: $B(\text{АПУ1}) = D/(g\mu_B)$ и для уровней $m_S = -3/2$, $m_S = -1/2$: $B(\text{АПУ2}) = 2D/(g\mu_B)$.

На Рисунке 5 показаны сигналы антипересечения спиновых уровней в отсутствии РЧ поля и спектры ОДМР, зарегистрированные при включении РЧ поля на трех частотах 50, 45 и 40 МГц. Видно, что при приближении линии ОДМР к положению сигнала АПУ1 интенсивность сигнала ОДМР увеличивается в несколько раз и приближается по своей интенсивности к сигналу антипересечения уровней. Более того, эти результаты открывают новые возможности для управления ядерными спинами ^{13}C и ^{29}Si , так как в области антипересечения происходит смешивание квантовых состояний, что должно приводить к ядерной поляризации в результате сверхтонких взаимодействий (СТВ). Дополнительные линии слабой интенсивности, например спутники в области первого антипересечения,

обусловлены именно СТВ. На вставке внизу показан в увеличенном масштабе сдвиг линии ОДМР в магнитном поле на частотах 50 и 45 МГц, демонстрирующий принцип измерения магнитных полей методом ОДМР, при этом размер монокристалла может быть уменьшен до десятков нанометров при сохранении высокой концентрации спиновых центров, поскольку ориентации всех спиновых центров выстроены вдоль одной оси c .

В разделе 4.2 описаны исследования ориентационных зависимостей сигналов антипересечения уровней в магнитном поле.

На Рисунке 6 (слева) показано изменение интенсивности ФЛ в области АПУ для спиновых центров V2, V3 и V4 в монокристалле 15R-SiC для разных ориентаций при температуре 300 К, при этом магнитное поле изменяется с прохождением через нулевое значение.

Спектры, представленные на Рисунке 6, состоят из пары сигналов АПУ в положительных и отрицательных значениях магнитного поля для каждого центра. Переходы с $\Delta m_S = \pm 2$ и $\Delta m_S = \pm 1$ обозначены кружками и квадратами, соответственно. Из рисунка видно, что величина магнитного поля АПУ с $\Delta m_S = \pm 2$ составляет $B \cong 2.5$ мТл, с $\Delta m_S = \pm 1$ $B = 5,0$ мТл для центра V2; соответствующие значения для центра V3 равны 0,2 мТл и 0,4 мТл; для центра V4 - 0,9 мТл и 1,8 мТл.

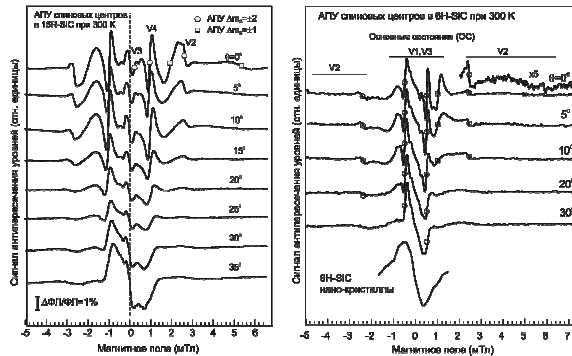


Рисунок 6 Относительное изменение ФЛ в зависимости от магнитного поля B , приложенного вдоль оси c в противоположных направлениях, в кристаллах 15R-SiC (слева) и 6H-SiC (справа) в области переходов $\Delta m_S = \pm 2$, $B = D / (g\mu_B)$ и $\Delta m_S = \pm 1$, $B = D / (g\mu_B)$. На спектрах слева наблюдаются антипересечения уровней спиновых центров V2, V3 и V4 в 15R-SiC. На спектрах справа наблюдаются антипересечения уровней спиновых центров V1, V2, V3 в 6H-SiC. Переходы с $\Delta m_S = \pm 2$ и с $\Delta m_S = \pm 1$ обозначены кружками и квадратами, соответственно. Справа внизу приведена зависимость интенсивности ФЛ, зарегистрированная при 300 К для нанокристаллов 6H-SiC.

Важным результатом приведенных исследований является наличие слабой ориентационной зависимости сигнала АПУ с $\Delta m_S = \pm 2$. При этом сигнал АПУ с $\Delta m_S = \pm 1$ исчезает уже для углов $\theta > 20^\circ$, тогда как величина АПУ с $\Delta m_S = \pm 2$ остается практически неизменной. Такая ориентационная зависимость сигнала АПУ с $\Delta m_S = \pm 2$ дает возможность обнаружить этот сигнал и в порошке, состоящем из нанокристаллов 6H-SiC, в котором сложно контролировать ориентацию, но эти образцы перспективно использовать в качестве нано-сенсоров. Сравнение ориентационной зависимости кристалла политипа 6H-SiC и сигнала от неориентированного порошка, состоящего из нанокристаллов 6H-SiC, показано на Рисунке 6 (справа).

В разделе 4.3 описаны исследования эффектов антипересечения уровней центров окраски для возбужденного состояния и эффектов кросс-релаксации (КР) между различными центрами окраски в карбиде кремния, проявляющихся в изменении интенсивности ФЛ. Приведен анализ воздействия температуры на их свойства.

На Рисунке 7 (слева) показан пример температурных измерений возбужденного состояния в кристалле политипа 4H-SiC при температурах 305, 240 и 80 К. Видно, что с ростом температуры положение в магнитном поле АПУ для основного состояния не сдвигается, тогда как положение в магнитном поле АПУ для возбужденного состояния сдвигается в область меньших полей (уменьшается параметр D). Были проведены измерения, с помощью которых была установлена температурная зависимость положения в магнитном поле АПУ для возбужденного состояния в кристалле 4H-SiC. Этот сдвиг для возбужденного состояния имеет практически линейный характер зависимости от температуры, при этом положение в магнитном поле АПУ для основного состояния не зависит от температуры. Сдвиг величины расщепления тонкой структуры для возбужденного состояния описывается как: $2D_{BC}(T) = 2D_{BC}^0 + \beta T$, где $2D_{BC}^0 = (1.06 \pm 0.02)$ ГГц и $\beta = (-2,1 \pm 0,1)$ МГц/К - термический сдвиг. Такого рода поведение может быть обусловлено размером центра (средним радиусом пространственного распределения волновой функции неспаренных электронов) в основном и возбужденном состояниях. Предполагается, что радиус основного состояния мал и температурные деформации кристалла не оказывают существенное влияние на основное состояние, то есть можно говорить о температурной изолированности основного состояния

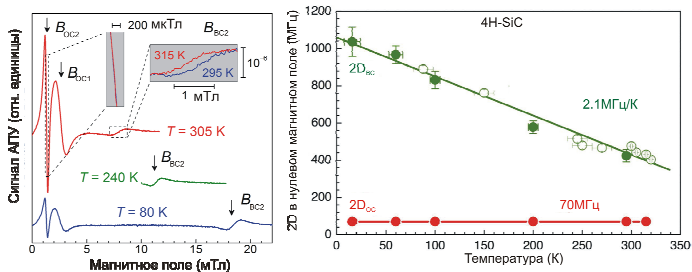


Рисунок 7. (Слева) Изменения фотолуминесценции центров окраски V2 в кристалле 4H-SiC в зависимости от постоянного магнитного поля B , измеренное с помощью синхронного детектирования на частоте модуляции магнитного поля при разных температурах. Стрелки указывают характерные магнитные поля для разных АПУ в основном и возбужденном состояниях. На вставках к рисунку приведены демонстрации температурного сдвига. (Справа) Температурная зависимость расщепления тонкой структуры в нулевом магнитном поле для центров окраски в основном и возбужденном состояниях в кристалле 4H-SiC.

спиновых центров. Радиус возбужденного состояния значительно больше по сравнению с основным состоянием, что и приводит к сильной температурной зависимости расщепления тонкой структуры.

Сигналы кросс-релаксации в виде изменения ФЛ оптически активных центров окраски со спином $S=3/2$ появляются, когда магнитное поле настраивает спиновое расщепление этих центров (назовем их «яркими» центрами) в резонанс со спиновым расщеплением оптически неактивных центров (назовем их «темными» центрами), находящимися в непосредственной близости от ярких центров. При этом важно, что расщепление тонкой структуры в нулевом поле D для темного центра с $S=1$ сильно зависит от температуры, и эта зависимость отражается на положении сигнала КР в магнитном поле.

На Рисунке 8 показана эволюция ФЛ как функции постоянного магнитного поля B при разных температурах в монокристалле 15R-SiC. Кружки с точкой при 0,2, 0,9 и 2,48 мТл показывают характерные магнитные поля для переходов с $\Delta m_S = \pm 2$ основного состояния, обозначенных как АПУОС1, для центров V3, V4 и V2, соответственно. Вертикальные сплошные и штриховые линии отражают отсутствие температурной зависимости для расщепления тонкой структуры в основном состоянии, то есть положения АПУ в магнитном поле для основного состояния не зависят от температуры. Наклонные пунктирные линии отражают зависимость положения сигналов АПУ в магнитном поле от температуры для возбужденного состояния (АПУВС), квадраты, на пунктирной линии и

зависимость положения сигналов КР от температуры в виде кружков на пунктирных линиях. На нижней вставке Рисунка 8 показан сдвиг одной из линий КР с изменением температуры от 35 °С до 42 °С – диапазон возможных изменений температуры для живых систем.

Пунктирная линия показывает экспериментальные точки (крестики) из измерений ЭПР и температурную зависимость $D(T)/2$ для темных центров. В диапазоне 180-300 К температурную зависимость положения КР в магнитном поле можно аппроксимировать линейной функцией $B_{КР}=B_0 - k \cdot T$; $\Delta B_{КР} = -k \cdot \Delta T$. Изменение магнитного поля $\Delta B_{КР}$ преобразуется в температуру по следующей формуле $\Delta T = -\Delta B_{КР}/k$.

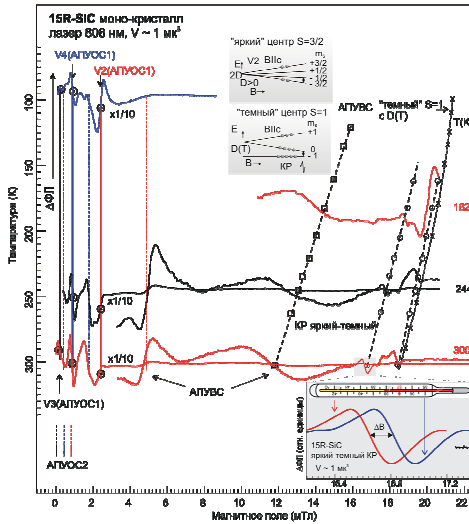


Рисунок 8. Синхронное детектирование изменения ФЛ в зависимости от магнитного поля B , зарегистрированное при разных температурах в монокристалле 15R-SiC. Кружки с точкой соответствуют положениям АПУ в магнитном поле для основного состояния центров окраски (АПУОС) V2, V3, V4. Вертикальные сплошные и пунктирные линии фиксируют отсутствие изменения расщеплений тонкой структуры (2D) для основного состояния; сплошные линии - для АПУ1 ($B=D$), пунктирные линии - для АПУ2 ($B=2D$). Наклонные пунктирные линии отражают изменения положения АПУ в магнитном поле для возбужденного состояния (квадраты, широкие линии) и КР (кружки, узкие линии). Верхняя вставка показывает схему энергетических уровней в магнитном поле, для ярких центров со спином $S=3/2$ (вверху) и для темных центров со спином $S=1$ (внизу) и условие КР показано стрелками. На нижней вставке изображен сдвиг линий КР с изменением температуры от 35 °С до 42 °С, соответствующих температурному диапазону медицинского градусника. Пунктирная линия показывает температурную зависимость расщепления тонкой структуры для темных центров, крестики обозначают экспериментальные точки из измерений ЭПР в работе [8].

Для наиболее интенсивных пиков: $B_0 = 21.8$ мТл; $k = 0.017$ мТл/К; и КР2: $B_0 = 23.8$ мТл; $k = 0.018$ мТл/К. По оценкам, чувствительность измерения температуры составляет приблизительно 10 мК/Гц^{1/2} в объеме около 1 мк³, выделяемом сфокусированным лазерным возбуждением в сканирующем конфокальном микроскопе.

В пятой главе описано использование сканирующего устройства для диагностики магнитных и температурных полей.

Описаны сенсоры на основе микро- или нанокристаллов SiC с ансамблем высоко локализованных спиновых центров окраски, помещенные на зонд атомно-силового микроскопа, которые могут быть размещены в непосредственной близости от внешних источников магнитного поля. Для исследований использовался радиоспектроскопический комплекс, включающий сканирующий спектрометр магнитного резонанса, созданный с использованием совмещенного АСМ и конфокального микроскопа. В качестве реализации метода массив спиновых центров окраски вводится в наноразмерный кристалл SiC, помещенный на острие зонда, который можно приблизить к источнику магнитного поля или к источнику температуры вплоть до расстояния в несколько нанометров.

На Рисунке 9 (а) представлен элемент сканирующего микроскопа на основе помещенного на острие АСМ микро- или нанокристалла SiC со спиновыми центрами, который служит в качестве чувствительного магнитометра (термометра) с субмикронным пространственным разрешением. Возможна также экспериментальная реализация на основе сканирующего микроскопа ближнего поля, при этом нанокристалл SiC может быть прикреплен непосредственно на конце изогнутого конусного оптического волокна или оптического зонда. Особенно перспективным для применений является уникальное свойство ФЛ и возбуждения ФЛ спиновых центров окраски в SiC: длины волн для возбуждения и регистрации ФЛ этих центров лежат в полосе прозрачности волоконной оптики и биологических объектов.

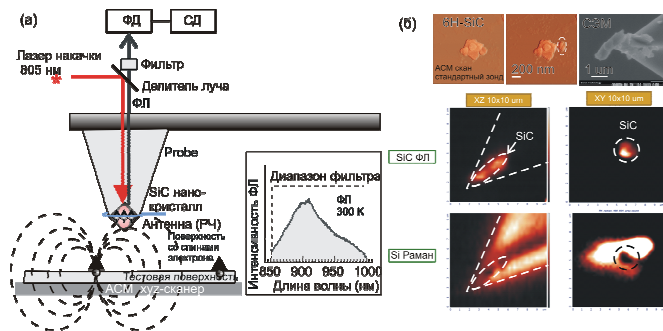


Рисунок 9 (а) Упрощенная схема сканирующего микроскопа на основе микро- или нанокристалла SiC со спиновыми центрами, помещенного на острие АСМ. Приведен спектр ФЛ при 300 К. (б) Верхний ряд: АСМ манипуляция и захват на кончик зонда nano-чешуйки SiC и изображение зонда в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) после захвата nano-кристалла. Средний и нижний ряды: тоновые изображения ФЛ спиновых центров в нанокристалле (SiC ФЛ) и комбинационного рассеяния кремния, проявляющие нанокристаллы SiC на кремниевом зонде (SiC Раман).

На Рисунке 9 (б) продемонстрирована манипуляция и захват на кончик зонда nano-кристалла SiC. В верхнем ряду последовательно показаны АСМ изображения агломерата SiC чешуек на Si подложке: до манипуляции, в ходе манипуляции и изображение в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) после захвата nano-кристалла (выделена пунктирным овалом) на кончик АСМ зонда. На среднем и нижнем рядах показаны тоновые изображения интенсивности сигналов ФЛ спиновых центров (SiC ФЛ) и комбинационного рассеяния кремния (Si Раман), проявляющие нанокристаллы 6H-SiC со спиновыми центрами на пирамидальном заострении кремниевого зонда NSG10. Спектр ФЛ нанокристалла 6H-SiC приведен на Рисунке 9 (а).

С помощью такого модифицированного АСМ зонда становится возможным проводить измерения магнитных и/или температурных полей, применяя все в диссертации методы и явления. Оптическое возбуждение ФЛ может осуществляться по разным схемам, в зависимости от конструкции микроскопа. Важным достоинством спиновых центров является возможность использовать один кристалл для регистрации магнитных и температурных полей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан и изготовлен сканирующий спектрометр магнитного резонанса на основе комбинации конфокального и атомно-силового микроскопов и зарегистрирован магнитный резонанс спиновых центров окраски в сфокусированном объеме лазерного возбуждения по изменению их фотолуминесценции при комнатных температурах.

2. В карбид кремния гексагональных и ромбических политипов (4H, 6H, 15R) методом облучения ионизирующим излучением (электронами, протонами, нейтронами) введены спиновые центры окраски, обладающие свойством оптического выстраивания населенностей спиновых уровней в широком диапазоне температур и эффективной фотолуминесценцией в ближней ИК области спектра (850-950 нм) с высоким квантовым выходом.

3. Осуществлено оптическое детектирование магнитного резонанса (ОДМР) на спиновых центрах окраски путем резонансного воздействия радиочастотным излучением на эти центры в широком интервале температур, включая комнатные, с высокой чувствительностью, вплоть до регистрации счетного количества спинов.

4. Обнаружен и продемонстрирован эффект "выжигания узких провалов" в неоднородно уширенных линиях ОДМР спиновых центров окраски в разных политипах карбида кремния при воздействии резонансного радиочастотного излучения на двух частотах, осуществлены спиновые манипуляции с выбранными спиновыми пакетами.

5. Наблюдался оптический отклик в магнитных полях, соответствующих антипересечению зеемановских спиновых уровней основного и возбужденного состояний центров окраски со спином $S=3/2$ в карбиде кремния в широком диапазоне температур, включая комнатные и выше, что позволило реализовать полностью оптические квантовые сенсоры магнитных полей и температур с субмикронным пространственным разрешением.

6. Зарегистрированы эффекты кросс-релаксации по оптическому каналу между спиновыми уровнями центров окраски с $S=3/2$, в которых происходит оптически индуцированное выстраивание спиновых уровней, и центрами окраски с $S=1$, в которых имеется Больцмановское распределения населенностей спиновых уровней, что позволяет реализовать полностью оптические квантовые сенсоры

температуры с субмикронным пространственным разрешением, ввиду зависимости положения сигналов кросс-релаксации в магнитном поле от температуры.

7. Выполнены исследования ОДМР и антипересечения уровней для спиновых центров окраски в нанокристаллах карбида кремния и разработаны сенсорные устройства с помещением упомянутых нанокристаллов на зонд атомно-силового микроскопа, совмещенного с конфокальным микроскопом.

8. Продемонстрированы возможности использования спиновых центров окраски в карбиде кремния в качестве сенсоров магнитного поля и температуры с субмикронным пространственным разрешением, а также в качестве элементной базы (кубитов, кудитов) для квантовых вычислений, работающих в условиях окружающей среды.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах:

A1. All-optical dc nanotesla magnetometry using silicon vacancy fine structure in isotopically purified silicon carbide / D. Simin, V. A. Soltamov, A. V. Poshakinskiy, **A. N. Anisimov** [et al.] // Phys. Rev. X. — 2016. — V.6. — P. 031014.

A2. Оптический квантовый термометр с субмикронным разрешением, основанный на явлении антипересечения уровней / **А.Н. Анисимов**, Р.А. Бабунц, М.В. Музафарова, А.П. Бундакова, И.В. Ильин, В.А. Солтамов, Н.Г. Романов, П.Г. Баранов // Письма в ЖТФ. — 2017. — Том 43. — вып. 7. — стр. 70-77.

A3. Оптический квантовый магнитометр с субмикронным разрешением, основанный на явлении антипересечения уровней / **А.Н. Анисимов**, Д.О. Толмачев, Р.А. Бабунц, М.В. Музафарова, А.П. Бундакова, И.В. Ильин, В.А. Солтамов, П.Г. Баранов, Е.Н. Мохов, G.V. Astakhov, V. Dyakonov // Письма в ЖТФ. — 2016. — Том 42. — вып. 12 — стр. 22-29

A4. Optical thermometry based on level anticrossing in silicon / **A. N. Anisimov**, D. Simin, V. A. Soltamov, S. P. Lebedev, P. G. Baranov, G. V. Astakhov and V. Dyakonov // Scientific Reports. — 2016. — V. 6. — Article number 33301.

A5. Spin centres in SiC for quantum technologies / G. V. Astakhov, D. Simin, V. Dyakonov, B. V. Yavkin, S. B. Orlinskii, I. I. Proskuryakov, **A. N. Anisimov**, V. A. Soltamov, P. G. Baranov // Applied Magnetic Resonance. — 2016. — V. 47, iss. 7. — P. 793–812.

A6. Spin centres in SiC for all-optical nanoscale quantum sensing under ambient conditions / **A. N. Anisimov**, R. A. Babunts, S. V. Kidalov, E. N. Mokhov, V. A. Soltamov and P. G. Baranov // JETP Letters. — 2016. — V. 104, iss. 2. — P. 82-87.

A7. Электронная структура и пространственное распределение спиновой плотности мелких доноров азота в кристаллической решетке SiC / М.В. Музафарова, И.В. Ильин, **А.Н. Анисимов**, Е.Н. Мохов, В.А. Солтамов, П.Г. Баранов // ФТТ. — 2016. — Том 58, вып. 12. — стр. 2319-2335.

A8. Room-Temperature Level Anticrossing and Cross-Relaxation Spectroscopy of Spin Color Centers in SiC Single Crystals and Nanostructures / **A.N. Anisimov**, V.A. Soltamov, E.N. Mokhov, P.G. Baranov, G. V. Astakhov, V. Dyakonov // Appl. Magn. Resonance. — 2018. — Vol49, iss. 1. — p. 85-95.

A9. Raman Spectra of Thick Epitaxial GaN Layers Formed on SiC by the Sublimation Sandwich Method / **A. N. Anisimov**, A. A. Wolfsona, and E. N. Mokhov //, Semiconductors. — 2018. — Vol. 52, No. 9. — p. 1225–1227.

A10. All-optical quantum thermometry based on spin-level cross-relaxation and multicenter entanglement under ambient conditions in SiC / **A.N. Anisimov**, V. A. Soltamov, I. D. Breev, R.A. Babunts E. N. Mokhov, G. V. Astakhov, V. Dyakonov, D. R. Yakovlev, D. Suter, and P. G. Baranov // AIP Advances. — 2018. — 8. — Article number 085304.

A11. Spin diagnostics of local polytypic composition of silicon carbide with submicron spatial resolution / **A. N. Anisimov**, S. S. Nagalyuk, M. V. Muzafarova, A. P. Bundakova R. A. Babunts, V. A. Soltamov, E. N. Mokhov, P. G. Baranov // Appl. Magn. Resonance. — 2018. — <https://doi.org/10.1007/s00723-018-1069-z>. — ISSN 1613-7507.

A12. Оптический квантовый термометр с субмикронным разрешением, основанный на явлении кросс-релаксации спиновых уровней / **А.Н. Анисимов**, Р.А. Бабунц, М.В. Музафарова, А.П. Бундакова, В.А. Солтамов, П.Г. Баранов // Письма в ЖТФ. — 2018. — том 44, вып. 17. — стр. 34-41.

A13. Физические основы применения сканирующего зонда со спиновыми центрами в SiC для субмикронного квантового зондирования магнитных полей и температур / **А. Н. Анисимов**, В. А. Солтамов, И. Д. Бреев, М. М. Халисов, Р. А. Бабунц, А. В. Анкудинов, П. Г. Баранов // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — том 108, вып. 9, — стр. 643 – 649.

Патенты:

П1. Способ измерения температуры / **Анисимов А.Н.**, Солтамов В.А., Музафарова М.В., Бундакова А.П., Бабунц Р.А., Баранов П.Г. // Патент РФ № 2617293, зарегистрирован в Госреестре 24.04.2017.

П2. Оптический квантовый термометр / **Анисимов А.Н.**, Бабунц Р.А., Музафарова М.В., Ильин И.В., Солтамов В.А., Баранов П.Г.// Патент РФ № 2617194, зарегистрирован в Госреестре 21.04.2017.

П3. Оптический магнитометр / Бабунц Р.А., Музафарова М.В., **Анисимов А.Н.**, Толмачев Д.О., Астахов Г.В., Солтамов В.А., Баранов П.Г.// Патент РФ № 2607840, зарегистрирован в Госреестре 20.01.2017.

П4. Способ измерения магнитного поля / Бабунц Р.А., Музафарова М.В., **Анисимов А.Н.**, Бундакова А.П., Толмачев Д.О., Астахов Г.В., Солтамов В.А., Баранов П.Г.// Патент РФ № 2601734, зарегистрирован в Госреестре 13.10.2016.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers/ A. Gruber, [et al.]// Science.— 1997.—V. 276. — Issue 5321, pp. 2012-2014.

2. EPR identification of the triplet ground state and photoinduced population inversion for a Si-C divacancy in silicon carbide /P. G. Baranov, [et al.] // JETP Lett. — 2005. — V. 82. — p. 441.

3. Spin polarization induced by optical and microwave resonance radiation in a Si vacancy in SiC: A promising subject for the spectroscopy of single defects / P. G. Baranov, [et al.]// JETP Lett. — 2007. — V. 86, p. 202.

4. Silicon vacancy in SiC as a promising quantum system for single-defect and single-photon spectroscopy/ P. G. Baranov, [et al.]// Phys. Rev. B. — 2011. — V. 83, 125203.

5. Room-Temperature quantum microwave emitters based on spin defects in silicon carbide / H. Kraus, [et al.]// Nature physics. — 2014. —V.10. — P. 157–162.

6. Magnetic field and temperature sensing with atomic-scale spin defects in silicon carbide/ H. Kraus [et al.]// Scientific Reports. — 2014. —№4. — Article number: 5303.

7. Coherent control of single spins in silicon carbide at room temperature/ M. Widmann, [et al.]// Nature Materials. — 2015. — V. 14, 164.

8. Centers in silicon carbide irradiated with neutrons and alpha-particles/ N. M. Pavlov, [et al.]// Sov. Phys. Semicond. —1975.— V. 9.— 845.