

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Использование NV-центров в алмазе для реализации новых схем
магнитометрии»**

Аспирант: Низов Владимир Алексеевич

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Ахмеджанов Ринат Абдулхаевич, д.ф.-м.н.,
заведующий лабораторией ИПФ РАН

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.21 Лазерная физика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород

2019

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Измерение характеристик магнитного поля является важной прикладной задачей физики. Магнитометрия широко применяется как в науке - физике магнетизма (в особенности в геофизике, в биомагнетизме, для диагностики магнитных структур), так и в технике, например, в устройствах накопителей данных (магнитных дисках), геопозиционирования (компактные компасы), и так далее.

Среди различных способов измерения магнитных полей особый интерес представляет область высокочувствительной магнитометрии. Увеличение чувствительности измерений приводит к бурному развитию многочисленных приложений магнитометров, как это, например, произошло с появлением СКВИД(сверхпроводящий квантовый интерферометр)-магнитометров. В настоящее время имеется большое количество разнообразных высокочувствительных методов измерения магнитных полей - магнитно-резонансная силовая микроскопия, СКВИД-магнитометры, магнитометры на эффекте гигантского магнетосопротивления и гигантского магнитного импеданса (ГМИ), квантовые оптические магнитометры и другие [1]. Каждый из этих методов может являться оптимальным для решения конкретной задачи. Основными характеристиками магнитометров являются чувствительность (измеряющаяся в единицах Тл/Гц^{1/2}) и пространственное разрешение. При выборе наиболее подходящего метода необходимо подбирать наилучшее сочетание этих параметров, учитывая особенности каждого метода. Так, например, СКВИД-магнитометры и оптические атомные магнитометры, свободные от спин-обменного уширения (SERF-магнитометры), обладают одними из лучших показателей по чувствительности (достигающей величин $\sim 10^{-15}$ Тл/Гц^{1/2}) [2; 3], но уступают в пространственном разрешении, а для магнитно-силовых микроскопов сильной стороной является как раз высокое пространственное разрешение на нанометровом уровне, но с меньшей чувствительностью. Поиск новых методов магнитометрии является актуальной задачей и активно продолжается.

Одними из наиболее перспективных и бурно развивающихся в последнее время являются квантовые оптические магнитометры с использованием NV-центров в алмазе [4–6]. Такие магнитометры сочетают в себе возможность достижения как сверхвысокого пространственного разрешения (при работе с одиночными центрами), так и высокой чувствительности (с использованием ансамбля) [7; 8]. Дополнительным преимуществом магнитометров с использованием NV-центров является возможность работы в нормальных условиях - при комнатной температуре, атмосферном давлении. Инертность алмаза позволяет использовать такие магнитометры в биологических исследованиях. Таким образом, подход к магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе отличается универсальностью, может быть оптимальным в широком спектре задач.

NV-центр (nitrogen-vacancy center) - точечный дефект алмаза, представляющий собой атом азота и вакансию в соседнем узле кристаллической решётки. Эти дефекты часто встречаются как в природных, так и синтетических образцах алмаза из-за большого количества азота в окружающей среде. Также их концентрация может быть дополнительно повышена

путем специальной обработки образца либо внедрением азота в процессе его роста. NV-центры могут существовать в нескольких зарядовых состояниях - NV^- , NV^0 , NV^+ . Но обычно (как и в рамках данной работы) под NV-центром подразумевается отрицательно заряженное состояние дефекта NV^- , которое благодаря особым оптическим свойствам используется для магнитометрии (и других приложений). Эти дефекты являются центрами окраски, при большой концентрации придающими алмазу оттенки розового и фиолетового цвета.

NV-центры обладают яркой, стабильной флуоресценцией при возбуждении оптической накачкой в диапазоне 400-637 нм. Спектр флуоресценции содержит бесфононную линию оптического перехода между основным 3A_2 и возбужденным 3E состояниями на длине волны 637 нм и соответствующее фононное крыло в диапазоне 637-800 нм. Схема энергетических уровней NV-центра в алмазе показана на Рисунке 0.1. Основное и возбужденное (при комнатной температуре) состояния представляют собой триплеты, состоящие из спиновых подуровней $m_S = 0, \pm 1$. Оптические переходы ${}^3A_2 \leftrightarrow {}^3E$ происходят с сохранением проекции спина. В отличие от подуровня $m_S = 0$ для подуровней $m_S = \pm 1$ возбужденного состояния возможен переход в основное состояние через систему вспомогательных уровней, происходящий без сохранения проекции спина. Это приводит к тому, что через несколько циклов оптической накачки происходит оптическая поляризация спина - большая часть населенности переносится в состояние $m_S = 0$. Флуоресценция NV-центра является спин-зависимой - её уровень определяется степенью поляризации спина.

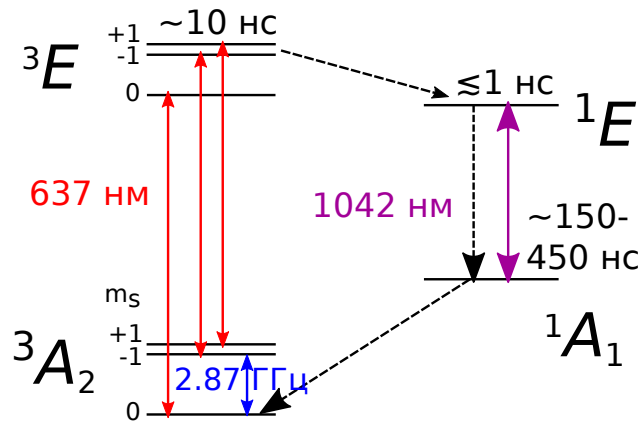


Рис. 0.1 — Энергетические уровни NV-центра в алмазе. Адаптировано из [9].

Для осуществления магнитометрии используется зависимость частот микроволновых переходов между спиновыми подуровнями основного состояния от магнитного поля из-за эффекта Зеемана. Главные члены в гамильтониане основного состояния NV-центра в магнитном поле имеют вид:

$$\frac{H}{h} = DS_z^2 + g\mu_B \vec{B} \vec{S},$$

где $D = 2.87$ ГГц – отстройка подуровня $m_S = 0$ в отсутствие магнитного поля, μ_B – магнетон Бора, $g \simeq 2$ – множитель Ланде. При приложении магнитного поля вдоль оси NV-центра (z) частоты переходов $m_S = 0 \leftrightarrow m_S = \pm 1$ изменяются линейно на $\frac{g\mu_B}{h} \simeq \pm 2.8$ МГц/Гс. В общем случае частоты микроволновых переходов зависят от величины магнитного поля и

угла между ним и направлением оси NV-центра. В случае слабых полей можно ограничиться линейным приближением, и считать, что расщепление переходов определяется проекцией неизвестного магнитного поля на ось NV-центра.

Благодаря наличию спин-зависимой флуоресценции определение частот микроволновых переходов происходит по наблюдению оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) [7; 10; 11]. При приложении резонансного СВЧ излучения часть населенности переносится из подуровня $m_S = 0$, уменьшая сигнал флуоресценции, возбуждаемой оптической накачкой (обычно нерезонансной, с использованием коммерчески доступных лазеров на длине волны 532 нм). Поэтому при наблюдении зависимости флуоресценции от частоты СВЧ наблюдаются провалы, соответствующие резонансным частотам. Возможность оптического детектирования повышает пространственное разрешение и чувствительность измерений магнитного поля по сравнению с определением частот переходов напрямую по резонансному поглощению СВЧ излучения (метод электронного парамагнитного резонанса). Это происходит потому, что оптическое излучение можно сфокусировать в гораздо меньший объем, чем микроволновое, а также детектирование света происходит намного эффективнее. При использовании техники счета фотонов возможно детектирование сигнала флуоресценции даже от одиночного NV-центра.

В принципе, метод ОДМР может применяться в широком диапазоне температур - от криогенной [12; 13] до 700 К [14]. Но частоты микроволновых переходов NV-центра также чувствительны к температуре за счет зависимости $D(T)$ [15]. Это позволяет использовать NV-центры как сенсоры температуры [16–19], но приводит к дополнительным сложностям при измерении магнитного поля. Одним из возможных путей решения данной проблемы является проведение измерений частот обоих микроволновых переходов, разность которых не зависит от D , и следовательно, от температуры.

Магнитометрия с использованием NV-центров включает два различных подхода к проведению измерений: использование одиночного дефекта и их ансамбля. Первый подход направлен на получение наилучшего пространственного разрешения, величина которого ограничена размером магнитометра и расстоянием до исследуемого объекта. В этом подходе размером магнитометра является размер NV-центра (~ 0.15 нм). Для достижения наибольшей близости к объекту исследования применяется схема на основе сканирующего атомно-силового микроскопа, в котором в качестве зонда используется алмаз (либо наноалмаз, либо специально выращенные наноструктуры в виде столбов) с одиночным NV-центром [20–23]. Такой подход позволяет проводить измерения магнитного поля с нанометровым пространственным разрешением и чувствительностью, достигающей нескольких десятков нТл/Гц^{1/2}. Во втором подходе применяются макроскопические образцы алмаза с NV-центрами. При этом для получения распределения магнитного поля либо образец алмаза полностью освещается накачкой и строится изображение флуоресценции, либо пучок накачки фокусируется в малую область образца и производится его сканирование. В обоих случаях пространственное разрешение ограничено снизу дифракцией (порядка мкм). Но за счет существенного увеличения яркости флуоресценции по сравнению с сигналом от одиночного NV-центра, при использовании ансамбля возрастает чувствительность измерения

магнитного поля. Например, достигнута чувствительность $\sim \mu\text{Tл}/\text{Гц}^{1/2}$ в детектируемом объеме $\sim 10^{-3} \text{ мм}^{-3}$ [24]. Кроме того, благодаря тому, что NV-центры могут иметь 4 различных направления оси симметрии в кристаллической решетке алмаза, при использовании ансамбля возможно одновременно проводить измерения проекций магнитного поля на эти направления и восстановить вектор неизвестного магнитного поля.

Оба подхода с использованием ОДМР NV-центров уже нашли многочисленные успешные применения в физике твердого тела и биофизике (см., например, обзоры [25; 26]). Среди них можно выделить детектирование магнитного поля, создаваемого одиночным электронным спином в нормальных условиях [27] (до этого другие методы требовали низких температур и высокий вакуум), визуализацию магнитных полей внутри клетки (с использованием контрастного агента для МРТ) [28] и наблюдение одиночного вихря сверхпроводящего тока в сверхпроводнике по количественному измерению магнитного поля [12].

В настоящее время происходит активный поиск подходов к развитию методов магнитометрии с использованием NV-центров. Предлагаются новые схемы измерений, направленные как на улучшение чувствительности в рамках метода ОДМР, так и на поиск других методов, его дополняющих.

Способы повышения чувствительности измерений методом ОДМР можно разделить на три направления. Первым направлением является эффективное снижение ширины наблюдаемого микроволнового резонанса при использовании импульсных воздействий СВЧ излучения. В случае определения постоянного магнитного поля, применяется импульсная последовательность Рамси, состоящая из двух $\pi/2$ импульсов, разделенных временной задержкой. Оптимальная величина задержки между импульсами определяется неоднородным временем декогерентизации T_2^* [7]. При измерении переменного магнитного поля с определенной частотой, возможно применение фазочувствительных схем измерений, дополнительно повышающих чувствительность (по аналогии с техникой синхронного детектирования). Например, применяется импульсная последовательность спинового эха, в которой между посередине между двумя $\pi/2$ импульсами, разделенными периодом измеряемого поля, добавляется π импульс. Дальнейшее увеличение чувствительности за счет обужения полосы рабочих частот магнитометра также возможно при использовании более сложных импульсных последовательностей динамической развязки спина [29]. Это направление является одним из активно развивающихся в последнее время направлений развития магнитометрии с использованием NV-центров. Другим направлением является повышение эффективности считывания состояния NV-центров, например, за счет улучшенного сбора флуоресценции [30], или при использовании отличных методов наблюдения микроволнового резонанса по изменению в уровне поглощения нерезонансной накачки [31] и инфракрасного излучения на переходе 1042 нм [32; 33] или в сигнале фототока, возникающего при воздействии оптической накачки [34]. Наконец, для улучшения чувствительности измерений методом ОДМР, применяют специально выращенные особо чистые образцы алмаза, в которых NV-центры имеют узкие резонансные линии.

Также в последнее время разрабатываются новые методы магнитометрии с использованием NV-центров, отличные от метода ОДМР, для того, чтобы компенсировать его

недостатки. В первую очередь представляют интерес методы, не требующие применения СВЧ излучения [35; 36], необходимость которого ограничивает спектр возможных применений ОДМР.

Таким образом, разработка новых методов магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе является актуальной и перспективной с точки зрения возможных применений задач.

Целью данной работы является развитие магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе за счет экспериментального исследования возможности реализации новых схем измерений.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы были рассмотрены следующие **задачи**:

1. Исследование особенностей оптически детектируемого магнитного резонанса NV-центров в алмазе в условиях резонансного оптического возбуждения при криогенных температурах.
2. Разработка метода магнитометрии с использованием NV-центров, свободного от применения микроволнового излучения, на основе наблюдения кросс-релаксационных резонансов.

Научная новизна:

1. Были выявлены принципиальные особенности оптически детектируемого магнитного резонанса NV-центров в алмазе в условиях резонансного оптического возбуждения при криогенных температурах.
2. Предложен и экспериментально продемонстрирован новый метод магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе на основе кросс-релаксационных резонансов.

Практическая значимость работы обусловлена её результатами, позволяющими в некоторых условиях усовершенствовать возможности магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе. При использовании резонансной накачки в условиях криогенных температур продемонстрировано увеличение контраста оптически детектируемого магнитного резонанса в NV-центрах, что представляет интерес с точки зрения увеличения чувствительности магнитометрии. Применение предложенного подхода к магнитометрии на основе наблюдения кросс-релаксационных резонансов позволяет проводить измерения без приложения СВЧ излучения, а значит расширить область применимости магнитометров с использованием NV-центров в алмазе на ряд случаев, где его применение может быть затруднено или может приводить к нежелательным воздействиям на объект исследования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение селективной оптической накачки (на длине волны бесфоновой линии и при криогенных температурах) позволяет существенно увеличить контраст оптически детектируемого магнитного резонанса в NV-центрах в алмазе.
2. Изменения в сигнале флуоресценции ансамбля NV-центров в алмазе, возникающие в магнитных полях, при которых для групп NV-центров, отличающихся направлением оси симметрии, совпадают частоты микроволновых переходов между спиновыми

подуровнями основного состояния, могут быть использованы для определения характеристик магнитного поля.

Достоверность полученных экспериментальных результатов обеспечивается их высокой повторяемостью. Обоснование теоретических представлений подкрепляется соответствующими экспериментальными проверками. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных журналах и апробированы обсуждениями на научных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- XVII, XVIII Научные школы «Нелинейные волны», Нижний Новгород, 2016 и 2018 г.;
- VI International Conference FRONTIERS OF NONLINEAR PHYSICS, Нижний Новгород, 2016;
- XXV Съезд по спектроскопии, Троицк, 2016;
- International conferences «Modern Development of Magnetic Resonance», Казань, 2016, 2017 и 2018 годы.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах проведения исследований: подготовке экспериментальной установки, проведении экспериментов, обработке результатов и их интерпретации, подготовке материалов к публикации. При этом вклад автора сравним с вкладом каждого из соавторов публикаций - сотрудников лаборатории нелинейной спектроскопии ИПФ РАН.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, из которых: 3 — изданы в рецензируемых научных журналах, 1 патент на изобретение, 7 — опубликованы в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 60 страниц, включая 17 рисунков. Список литературы содержит 70 наименований.

Содержание работы

Во **введении** приводится общая характеристика работы: обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту. Также приведены основные сведения о NV-центрах в алмазе и магнитометрии с их использованием.

Первая глава посвящена исследованию особенностей оптически детектируемого магнитного резонанса в ансамблях NV-центров в алмазе при резонансном оптическом возбуждении и криогенной температуре. В разделе 1.1 рассматривается теоретическая модель для описания качественных особенностей ОДМР в рассматриваемых условиях. Предлагаемая модель учитывает селективный характер узкополосной резонансной оптической накачки, благодаря которому в неоднородно уширенном ансамбле происходит выделение нескольких

групп NV-центров с частотами переходов, соответствующих частоте возбуждающего лазера. Для каждой из групп происходит перекачка населенности с рабочего спинового подуровня на подуровень с другой проекцией спина, что приводит к подавлению сигнала флуоресценции. При наблюдении ОДМР, то есть при приложении резонансного СВЧ излучения, происходит обратное заселение, и уровень флуоресценции увеличивается. Таким образом, по сравнению с традиционным ОДМР с использованием нерезонансной оптической накачки, происходит «инвертирование» резонанса (увеличение флуоресценции, а не уменьшение), а его контраст определяется временем релаксации населенности и может быть существенно выше. Раздел 1.2 посвящен экспериментальной части работы по данной главе. В подразделе 1.2.1 описана экспериментальная установка и приведены сведения о имеющихся образцах алмаза. В подразделе 1.2.2 представлены результаты измерений и их обсуждение. Экспериментально продемонстрированы качественные особенности, описанные в рамках предлагаемой теоретической модели. В лучших образцах величина контраста ОДМР достигает 50 %. Также представлены измерения зависимости ОДМР от температуры, обнаружена точка переворота ~ 35 К. Кроме того, приводятся результаты дополнительных импульсных измерений для проверки предлагаемой модели. В заключении к главе 1 сформулированы основные результаты исследования ОДМР в условиях селективной оптической накачки.

Вторая глава посвящена новому методу магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе, свободного от применения СВЧ излучения. Этот метод основан на наблюдении кросс-релаксационных резонансов в сигнале флуоресценции NV-центров, возбуждаемой оптической накачкой, при сканировании приложенного магнитного поля. В введении к главе 2 дан краткий обзор методов магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе, в отличие от распространенного метода ОДМР не требующих приложения СВЧ излучения, нежелательного в ряде приложений (например, при исследовании проводящих магнитных структур). Раздел 2.2 посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию кросс-релаксационных резонансов в NV-центрах в алмазе. Описан механизм, приводящий к появлению кросс-релаксационных резонансов при использовании резонансной оптической накачки и криогенной температуры. В этих условиях уровень флуоресценции определяется релаксацией населенности спиновых подуровней основного состояния. При близости частот микроволновых переходов у групп NV-центров, ориентированных различным образом по отношению к кристаллической решетке алмаза, за счет кросс-релаксации увеличивается скорость релаксации населенности спиновых подуровней и, соответственно, изменяется уровень флуоресценции. Определены условия на магнитные поля, в которых возможна кросс-релаксация между различными группами NV-центров. Приведены результаты экспериментов, демонстрирующие возможность использования для магнитометрии измерения положений кросс-релаксационных резонансов, наблюдаемых при сканировании приложенного магнитного поля. Показано, что кросс-релаксационные резонансы наблюдаются как при резонансной оптической накачке в криогенных температурах, так и при комнатной температуре (соответственно, нерезонансной накачке). В разделе 2.3 предлагается протокол векторного измерения магнитного поля при использовании монокристаллического алмаза, в рамках которого сканируемое магнитное поле направлено вдоль главных кристаллографических осей.

Оценены величины предельной чувствительности предлагаемой схемы измерений. Раздел 2.4 посвящен рассмотрению возможности использования поликристаллических алмазов для реализации магнитометрии на основе кросс-релаксационных резонансов. Описана методика и результаты моделирования зависимости флуоресценции поликристалла со случайной ориентацией кристаллографических осей кристаллитов от магнитного поля. Показано, что в результате усреднения по большому числу случайных ориентаций, профиль флуоресценции от величины сканируемого магнитного поля содержит единственный кросс-релаксационный резонанс, положение центра которого позволяет непосредственно определить проекцию измеряемого магнитного поля на направление сканируемого. Ширина резонанса определяется поперечной составляющей измеряемого магнитного поля и позволяет проводить измерения магнитных полей величиной до ~ 5 Гс. Представлены результаты экспериментов по наблюдению кросс-релаксационного резонанса при использовании в качестве поликристалла склейки из ~ 25 микрокристаллов. В заключении к главе 2 приводятся её основные результаты.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Основные результаты работы

1. Экспериментально продемонстрировано, что при использовании резонансной оптической накачки в условиях криогенных температур происходит «инвертирование» оптически детектируемого магнитного резонанса в NV-центрах в алмазе (происходит увеличение сигнала флуоресценции при приложении резонансного СВЧ излучения, а не уменьшение как при «традиционном» ОДМР с нерезонансной накачкой). При этом наблюдается существенное увеличение контраста ОДМР, что может быть интересным для потенциальных магнитометрических приложений. Показано, что данный эффект пропадает при температурах выше ~ 35 К. Предложена модель, объясняющая наблюдаемые особенности.
2. Проведены наблюдения резонансов, возникающих в сигнале флуоресценции NV-центров в алмазе при условии возникновения кросс-релаксации между различными группами центров по направлению оси симметрии. Продемонстрирована возможность использования измерения положений кросс-релаксационных резонансов при сканировании дополнительно приложенного магнитного поля для определения характеристик измеряемого магнитного поля.
3. Предложен протокол магнитометрии на основе кросс-релаксационных резонансов при использовании монокристалла алмаза, позволяющий проводить измерение величины и направления неизвестного магнитного поля без использования СВЧ излучения. Результаты измерений не чувствительны к изменениям температуры.
4. Показана и экспериментально продемонстрирована возможность измерения проекции магнитного поля на заданное направление по наблюдению кросс-релаксационного резонанса NV-центров в поликристаллическом алмазе. Применение поликристаллического алмаза позволяет упростить процедуру измерений и конструкцию магнитометра, работающего без использования СВЧ излучения.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Optically detected magnetic resonance in negatively charged nitrogen-vacancy centers in diamond under resonant optical excitation at cryogenic temperatures / R. Akhmedzhanov [и др.] // *Physical Review A*. — 2016. — Дек. — Т. 94, № 6. — С. 063859. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.94.063859>.
- A2. Microwave-free magnetometry based on cross-relaxation resonances in diamond nitrogen-vacancy centers / R. Akhmedzhanov [и др.] // *Physical Review A*. — 2017. — Июль. — Т. 96, № 1. — С. 013806. — URL: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.96.013806>.
- A3. Использование поликристаллических алмазов для магнитометрии на основе взаимодействия неэквивалентно ориентированных групп NV-центров / Р. А. Ахмеджанов [и др.] // *Квантовая электроника*. — 2018. — Т. 48, № 10. — С. 912–915. — URL: <https://dx.doi.org/10.1070/QEL16759>.
- A4. Способ измерения характеристик магнитного поля : Пат. 2654967 Рос. Федерация : МПК G01R 33/02 (2006.01) / Р. А. Ахмеджанов [и др.]. — № 2017115396 ; заявл. 02.05.2017 ; опубл. 23.05.2018, Бюл. № 15. — 14 с.
- A5. Особенности оптически детектируемого магнитного резонанса NV-центров в алмазе при резонансном возбуждении и криогенной температуре / Р. А. Ахмеджанов [и др.] // Тезисы докладов молодых учёных научной школы «Нелинейные волны – 2016». — 2016. — С. 109.
- A6. Inversion of optically detected magnetic resonance of NV-centers in diamond under resonant excitation / R. A. Akhmedzhanov [и др.] // *Frontiers of Nonlinear Physics 2016. Proceedings*. — 2016. — С. 315–316.
- A7. Оптически детектируемый магнитный резонанс NV-центров в алмазе при резонансном возбуждении и криогенных температурах / Р. А. Ахмеджанов [и др.] // XXV Съезд по спектроскопии: Сборник тезисов. — 2016. — С. 77–78.
- A8. Optically detected magnetic resonance in diamond NV- centers under resonant optical excitation at cryogenic temperatures / R. A. Akhmedzhanov [и др.] // *Abstracts of the international conference "Modern Development of Magnetic Resonance"*. — 2016. — С. 51.
- A9. Cross Relaxation Magnetometry with Diamond NV centers / R. A. Akhmedzhanov [и др.] // *Abstracts of the international conference "Modern Development of Magnetic Resonance"*. — 2017. — С. 48.
- A10. Применение поликристаллических алмазов для магнитометрии на основе кросс-релаксационного взаимодействия групп NV-центров / В. А. Низов [и др.] // Тезисы докладов молодых учёных научной школы «Нелинейные волны – 2018». — 2018. — С. 125.
- A11. Cross-Relaxation Magnetometry in Diamond NV-Centers with Polycrystalline Samples / R. A. Akhmedzhanov [и др.] // *Abstracts of the international conference "Modern Development of Magnetic Resonance"*. — 2018. — С. 20.

Список литературы

1. High Sensitivity Magnetometers / под ред. А. Grosz, М. J. Haji-Sheikh, S. C. Mukhopadhyay. — Springer International Publishing, 2017. — URL: <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8>.
2. Field-stable SQUID magnetometer with sub-fT Hz $-1/2$ resolution based on sub-micrometer cross-type Josephson tunnel junctions / M. Schmelz [и др.] // Superconductor Science and Technology. — 2011. — Апр. — Т. 24, № 6. — С. 065009. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/24/6/065009>.
3. *Budker D., Romalis M.* Optical magnetometry // Nature Physics. — 2007. — Апр. — Т. 3, № 4. — С. 227–234. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphys566>.
4. Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond / L. Rondin [и др.] // Reports on Progress in Physics. — 2014. — Т. 77, № 5. — С. 056503. — URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/5/056503>.
5. Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond: Nanoscale Sensors for Physics and Biology / R. Schirhagl [и др.] // Annual Review of Physical Chemistry. — 2014. — Апр. — Т. 65, № 1. — С. 83–105. — URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040513-103659>.
6. *Jensen K., Kehayias P., Budker D.* Magnetometry with Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond // Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. — Springer Nature, сент. 2017. — С. 553–576. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8_18.
7. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution / J. M. Taylor [и др.] // Nat Phys. — 2008. — Сент. — Т. 4, № 10. — С. 810–816. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nphys1075>.
8. Nanoscale magnetometry with NV centers in diamond / S. Hong [и др.] // MRS Bull. — 2013. — Февр. — Т. 38, № 02. — С. 155–161. — URL: <http://dx.doi.org/10.1557/mrs.2013.23>.
9. Optical properties of the nitrogen-vacancy singlet levels in diamond / V. M. Acosta [и др.] // Phys. Rev. B. — 2010. — Ноябрь. — Т. 82, № 20. — С. 201202. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.82.201202>.
10. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond / J. R. Maze [и др.] // Nature. — 2008. — Окт. — Т. 455, № 7213. — С. 644–647. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature07279>.
11. Magnetic field imaging with nitrogen-vacancy ensembles / L. M. Pham [и др.] // New Journal of Physics. — 2011. — Апр. — Т. 13, № 4. — С. 045021. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/13/4/045021>.
12. Quantitative nanoscale vortex imaging using a cryogenic quantum magnetometer / L. Thiel [и др.] // Nature Nanotechnology. — 2016. — Май. — Т. 11, № 8. — С. 677–681. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2016.63>.

13. Scanned probe imaging of nanoscale magnetism at cryogenic temperatures with a single-spin quantum sensor / M. Pelliccione [и др.] // *Nature Nanotech.* — 2016. — Май. — Т. 11, № 8. — С. 700–705. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2016.68>.
14. Measurement and Control of Single Nitrogen-Vacancy Center Spins above 600 K / D. M. Toyli [и др.] // *Phys. Rev. X.* — 2012. — Июль. — Т. 2, № 3. — С. 031001. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.2.031001>.
15. Temperature Dependence of the Nitrogen-Vacancy Magnetic Resonance in Diamond / V. M. Acosta [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Февр. — Т. 104, № 7. — С. 070801. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.070801>.
16. High-sensitivity temperature sensing using an implanted single nitrogen-vacancy center array in diamond / J. Wang [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2015. — Апр. — Т. 91, вып. 15. — С. 155404. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.155404>.
17. Nanometre-scale thermometry in a living cell / G. Kucsko [и др.] // *Nature.* — 2013. — Авг. — Т. 500, № 7460. — С. 54–58. — URL: <https://dx.doi.org/10.1038/nature12373>.
18. Precise temperature sensing with nanoscale thermal sensors based on diamond NV centers / S. Choe [и др.] // *Current Applied Physics.* — 2018. — Сент. — Т. 18, № 9. — С. 1066–1070. — URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2018.06.002>.
19. *Sotoma S., Epperla C. P., Chang H.-C.* Diamond Nanothermometry // *ChemNanoMat.* — 2017. — Нояб. — Т. 4, № 1. — С. 15–27. — URL: <https://dx.doi.org/10.1002/cnma.201700257>.
20. *Degen C. L.* Scanning magnetic field microscope with a diamond single-spin sensor // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — Т. 92, № 24. — С. 243111. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2943282>.
21. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions / G. Balasubramanian [и др.] // *Nature.* — 2008. — Окт. — Т. 455, № 7213. — С. 648–651. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature07278>.
22. Nanoscale magnetic field mapping with a single spin scanning probe magnetometer / L. Rondin [и др.] // *Applied Physics Letters.* — 2012. — Т. 100, № 15. — С. 153118. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3703128>.
23. A robust scanning diamond sensor for nanoscale imaging with single nitrogen-vacancy centres / P. Maletinsky [и др.] // *Nature Nanotech.* — 2012. — Апр. — Т. 7, № 5. — С. 320–324. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2012.50>.
24. Subpicotesla Diamond Magnetometry / T. Wolf [и др.] // *Phys. Rev. X.* — 2015. — Окт. — Т. 5, № 4. — С. 041001. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.5.041001>.
25. *Casola F., Sar T. van der, Yacoby A.* Probing condensed matter physics with magnetometry based on nitrogen-vacancy centres in diamond // *Nature Reviews Materials.* — 2018. — Янв. — Т. 3, № 1. — С. 17088. — URL: <https://dx.doi.org/10.1038/natrevmats.2017.88>.

26. Diamond Quantum Devices in Biology / Y. Wu [и др.] // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2016. — Апр. — Т. 55, № 23. — С. 6586–6598. — URL: <https://dx.doi.org/10.1002/anie.201506556>.
27. Nanoscale magnetic imaging of a single electron spin under ambient conditions / M. S. Grinolds [и др.] // *Nat Phys*. — 2013. — Февр. — Т. 9, № 4. — С. 215–219. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nphys2543>.
28. Mapping the microscale origins of magnetic resonance image contrast with subcellular diamond magnetometry / H. C. Davis [и др.] // *Nature Communications*. — 2018. — Янв. — Т. 9, № 1. — С. 131. — URL: <https://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-02471-7>.
29. Spin ensemble-based AC magnetometry using concatenated dynamical decoupling at low temperatures / D. Farfurnik [и др.] // *Journal of Optics*. — 2018. — Янв. — Т. 20, № 2. — С. 024008. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/2040-8986/aaa1bf>.
30. Efficient photon detection from color centers in a diamond optical waveguide / D. L. Sage [и др.] // *Phys. Rev. B*. — 2012. — Март. — Т. 85, № 12. — С. 121202. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.121202>.
31. Nitrogen-vacancy ensemble magnetometry based on pump absorption / S. Ahmadi [и др.] // *Physical Review B*. — 2018. — Янв. — Т. 97, № 2. — С. 024105. — URL: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.97.024105>.
32. Broadband magnetometry by infrared-absorption detection of nitrogen-vacancy ensembles in diamond / V. M. Acosta [и др.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2010. — Т. 97, № 17. — С. 174104. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3507884>.
33. Cavity-Enhanced Room-Temperature Magnetometry Using Absorption by Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond / K. Jensen [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — Апр. — Т. 112, № 16. — С. 160802. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.160802>.
34. Photoelectric detection of electron spin resonance of nitrogen-vacancy centres in diamond / E. Bourgeois [и др.] // *Nature Communications*. — 2015. — Окт. — Т. 6. — С. 8577. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms9577>.
35. Microwave-free magnetometry with nitrogen-vacancy centers in diamond / A. Wickenbrock [и др.] // *Applied Physics Letters*. — 2016. — Авг. — Т. 109, № 5. — С. 053505. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4960171>.
36. Magneto-optical imaging of thin magnetic films using spins in diamond / D. A. Simpson [и др.] // *Sci. Rep.* — 2016. — Март. — Т. 6. — С. 22797. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/srep22797>.