

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной работе

Университета ИТМО

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

20 сентября 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» на диссертацию Дмитриева Александра Константиновича «Многочастотное возбуждение оптически детектируемого магнитного резонанса в центрах окраски в алмазе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Актуальность работы

Диссертационная работа посвящена исследованию свойств и поиску областей применения отрицательно заряженного азотно-вакансионного (или NV) центра в алмазе с использованием методик оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Совокупность особенностей NV центра (широкая полоса фотолюминесценции в диапазоне видимого света, возможность оптической накачки долго живущих электронных спиновых состояний, фотостабильность), свойств алмаза (оптическая прозрачность, химическая инертность) и обширных возможностей метода ОДМР при комнатной температуре полностью объясняют актуальность проделанной работы. На данный момент повсеместно ведутся исследовательские работы, связанные с NV центром и его применением в самых различных областях: от задач, связанных с детектированием магнитных полей и температуры, до задач квантовой оптики и информатики. Результаты, представленные в данной работе, открывают новые возможности и расширяют границы применения данного объекта.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении приводится общая характеристика работы, в которой обоснована её актуальность, сформулированы цели и задачи. Представлены объект, предмет и метод

исследования. Отмечены научная новизна, теоретическое и прикладное значение работы, достоверность полученных результатов, личный вклад автора. Сформированы основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о структуре диссертации, её объеме и апробации.

Первая глава (обзор литературы) содержит исчерпывающую информацию об NV центре как объекте исследования: его физической структуре, электронной структуре и основных свойствах. Также в этой главе изложены принципы и особенности метода ОДМР в применении к NV центру. Рассмотрены основные достижения последних лет, связанные с исследованием и применением NV центров. Отдельно уделено внимание применению данных центров окраски в магнитометрии.

Во второй главе подробно описана экспериментальная установка, используемая автором. Представлена необходимая информация обо всех структурных элементах, объяснен их выбор. Также дается информация об объекте исследования: его происхождении, типе и способе приготовления.

Третья глава посвящена созданию микроразмерного квантового магнитометрического датчика на ансамбле NV центров в алмазе. Данная глава включает рассмотрение достаточно широкого спектра применимости такого датчика в зависимости от целей и применяемых средств. Рассмотрена возможность измерения направления магнитного поля, за счет реализации методики, позволяющей исключить области «мертвых» угловых зон датчика. Также представлено применение методики комбинированного возбуждения ОДМР для прецизионного измерения компонент вектора магнитного поля. Приведены перспективы реализации датчика слабого магнитного поля в данной конфигурации.

В четвертой главе исследовано одночастотное ВЧ возбуждение ОДМР в образце алмаза, содержащем ансамбль NV центров. Результатом данной работы стало наблюдение ультразвукового ядерного спинового резонанса.

В пятой главе представлено достаточно полное исследование двухчастотного возбуждения (СВЧ+ВЧ) ОДМР в алмазе, включающее как экспериментальное наблюдение высококонтрастных магнитонезависимых ОДМР резонансов, так и теоретическое объяснение, сформулированное совместно с теоретической группой университета Корнелла на основе экспериментальных данных, полученных автором.

Шестая глава посвящена исследованию эффекта магнитоиндуцированного поглощения радиочастотного ВЧ излучения при одночастотном возбуждении ОДМР в алмазе.

Научная новизна

Данной работе присуща исключительная научная новизна, что отражается в применении к NV центрам вариаций методик ОДМР ранее не применявшихся, например метод комбинированного возбуждения, позволяющий существенно увеличить чувствительность магнитометрического датчика. Также работа крайне интересна наблюдением совершенно новых результатов, которые позволяют лучше понимать процессы, происходящие в энергетической структуре центра окраски в кристалле алмаза. К таким результатам можно отнести наблюдение магнитонезависимых резонансов при совмещенном СВЧ+ВЧ возбуждении ОДМР и магнитоиндуцированных резонансов при одночастотном ВЧ возбуждении.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением зарекомендовавших себя схем возбуждения и регистрации магнитного резонанса. Результаты работы находятся в согласии с известными экспериментальными результатами, поддаются численному моделированию и подтверждаются теорией.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в создании и развитии экспериментальной установки в зависимости от особенностей исследования, проведении эксперимента и обработке полученных данных, принятии активного участия в интерпретации полученных экспериментальных данных. Это подтверждается доскональным знанием и пониманием проделанной работы, а именно: деталей и особенностей экспериментальной установки, алгоритмов проведения эксперимента и последующей обработки данных, интерпретации результатов.

Научная и практическая ценность работы

Полученные в работе результаты представляют значительный интерес, как для фундаментальных исследований, так и для исследований прикладного характера, нацеленных на практическое применение.

С одной стороны, полученные в рамках исследования высококонтрастных магнине независимых ОДМР резонансов результаты позволили провести численное моделирование и построить теоретическое объяснение наблюдаемым зависимостям. Тот факт, что полученные спектры обусловлены взаимодействием таких квантовых эффектов, как расщепление энергетических уровней под воздействием сильного поля (расщепление Аутлера-Таунса) и туннельные переходы Ландау-Зенера, возникающие в условиях антипересечения уровней в нулевом магнитном поле, шире раскрывает понимание процессов в структуре центра. С другой стороны, наблюдаемые резонансы за счет своих уникальных свойств могут быть использованы для решения задачи построения сверхкомпактного, устойчивого к ускорениям и вибрациям стандарта частоты.

Также научная и практическая значимость присущи исследованию одночастотного ВЧ возбуждения ОДМР в алмазе в слабом и нулевом магнитных полях. Во-первых, наблюдаемый ультразвукий резонанс демонстрирует возможность создания и детектирования ядерной ориентации посредством оптической накачки без использования СВЧ поля. Это совершенно новый и неожиданный результат, который ставит новую задачу для теоретического исследования. Во-вторых, наблюдаемый в рамках этого исследования эффект квазирезонансного магнито зависимого поглощения радиочастотного ВЧ излучения позволяет реализовать на его основе субмиллиметровый магнитометр слабого магнитного поля, не имеющий конкурентов для инвазивных исследований в медицине и биологии.

Диссертационная работа представляет готовые методы, позволяющие улучшить характеристики магнитометрических датчиков на основе NV центров: метод комбинированного возбуждения, повышающий чувствительность датчика, и метод селективного возбуждения ОДМР ансамбля NV центров, исключая «мертвые» угловые зоны, тем самым позволяя определять направление внешнего магнитного поля.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты работы открывают перспективы создания как отдельных датчиков магнитного поля (для разных диапазонов) и температуры, так и единого универсального датчика. Непремененно необходимо сотрудничество с медицинскими организациями, вариант инвазивного магнитометрического датчика в современных реалиях очень важен для задач, связанных с исследованиями мозга и мозговой активности.

Замечания

1. Эксперименты по определению магнитной чувствительности выполнялись без экранирования или стабилизации магнитного поля. Следует пояснить причины такого решения, и обосновать его применимость к проводимым экспериментам.
2. На стр. 111 диссертации сказано, что "сигнал принимает нулевое значение при нулевом значении модуля внешнего поля", но из рисунка следует, что нулевое значение сигнала реализуется при ненулевом значении поля.
3. На рисунках 3.11 и 3.12 на страницах 86 и 87 частично или полностью отсутствуют подписи осей и единиц измерения.
4. Представляет интерес зависимость сигнала ОДМР от интенсивности накачки, но в работе эти данные не представлены. Проводились ли такие исследования?
5. Как объясняется отсутствие погрешностей на большей части графиков?
6. В литературном обзоре подробно рассказано о спиновом окружении NV центра, об особенностях взаимодействия с кристаллической решеткой алмаза, но в дальнейшем нет информации об учете факторов, отвечающих за однородное и неоднородное уширения резонансных линий в конкретных экспериментах.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку и не снижают научной и практической ценности диссертации.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: Международная молодежная конференция «Физика.СПб», Санкт-Петербург, 26-29 октября, 2015; 13th International Youth School-Conference "Magnetic resonance and its applications", Saint Petersburg, Russia, November 20-26, 2016; Международная молодежная конференция «Физика.СПб/2017», Санкт-Петербург, 24-26 октября, 2017; 15th International School-Conference Spinus 2018: Magnetic resonance and its applications, Saint Petersburg, Russia, April 1-6, 2018; Международная конференция «Физика.СПб/2018», Санкт-Петербург, 23-25 октября, 2018; 16th International School-Conference Spinus 2019: Magnetic resonance and its applications, Saint Petersburg, Russia, March 31 – April 5, 2019; 7th annual workshop on optically-pumped magnetometers, Mainz, Germany, August 14-16, 2019).

Публикации

Основные результаты работы были опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

1. Vershovskii A. K., Dmitriev A. K. Combined excitation of an optically detected magnetic resonance in nitrogen-vacancy centers in diamond for precision measurement of the components of a magnetic field vector / A. K. Vershovskii, A. K. Dmitriev // *Technical Physics Letters*. – 2015. – Vol. 41. – P. 1026-1029.
2. Dmitriev A. K., Vershovskii A. K. Concept of a microscale vector magnetic field sensor based on nitrogen-vacancy centers in diamond // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33. – P. B1-B4.
3. Dmitriev A. K., Vershovskii A. K. Multi-frequency ODMR of Nitrogen-Vacancy Color Centers in Diamond Crystals in zero magnetic fields // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1135. – P. 012051.
4. Dmitriev A. K., Vershovskii A. K. Ultra-Narrow Low-Field Nuclear Spin Resonance in NV Centers in Bulk Diamond Crystal // *Applied Magnetic Resonance*. – 2019. – Vol. 50. – No. 4. – P. 599-604.
5. Dmitriev A. K., Chen H. Y., Fuchs G. D., Vershovskii A. K. Dual-frequency spin-resonance spectroscopy of diamond nitrogen-vacancy centers in zero magnetic field // *Physical Review A*. – 2019. – Vol. 100. – P. 011801.
6. Dmitriev A. K., Vershovskii A. K. High-Contrast Two-Frequency Optically Detected Resonances in Diamond Nitrogen-Vacancy Centers for Timekeeping Schemes // *IEEE Sensors Letters*. – 2020. – Vol. 4. – No. 1. – P. 1-4.
7. Dmitriev A. K., Vershovskii A. K. Weak magnetic field sensor based on nitrogen-vacancy color centers in a diamond crystal // *Technical Physics*. – 2020. – Vol. 65. – No. 8. – P. 1301-1306.

Заключение

По актуальности поставленных задач, новизне, научной и практической значимости, достоверности полученных результатов, степени обоснованности выводов и рекомендаций, объему выполненных исследований, уровню апробации и публикаций основных результатов диссертация Дмитриева Александра Константиновича

«Многочастотное возбуждение оптически детектируемого магнитного резонанса в центрах окраски в алмазе» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу. Автореферат полностью отражает основные положения диссертации.

Диссертационная работа Дмитриева А.К. «Многочастотное возбуждение оптически детектируемого магнитного резонанса в центрах окраски в алмазе» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук от 19.08.2019, а соискатель Дмитриев Александр Константинович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Отзыв рассмотрен и утвержден на семинаре Центра "Информационные оптические технологии" Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» 15 сентября 2021 года.

Отзыв ведущей организации подготовил:

д. ф.-м. н., профессор

Рожественский
Юрий Владимирович

Председатель семинара:

д. ф.-м. н., профессор
директор Центра «Информационные
оптические технологии»

Федоров
Анатолий Валентинович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, литер А.

Телефон: +7 (812) 480-00-00

E-mail: od@itmo.ru