

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии
наук, по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 7 октября 2021 г. № 7

О присуждении Дмитриеву Александру Константиновичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Многочастотное возбуждение оптически детектируемого магнитного резонанса в центрах окраски в алмазе» по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника» принята к защите 10 июня 2021 года (протокол № 6) диссертационным советом ФТИ 34.01.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенного по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75 от 12 июля 2019 года.

Соискатель Дмитриев Александр Константинович, «15» декабря 1991 года рождения, в 2015 году окончил с отличием магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». В 2019 году окончил аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе по направлению 03.06.01 – «Физика и астрономия». В настоящее время работает исполняющим обязанности младшего научного сотрудника в лаборатории Атомной радиоспектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории Атомной радиоспектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Вершовский Антон Константинович, ведущий научный сотрудник лаборатории Атомной радиоспектроскопии Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Запасский Валерий Сергеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории Оптики спина им. И.Н. Уральцева СПбГУ дал положительный отзыв на диссертацию.
2. Баранов Павел Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник – заведующий лабораторией Микроволновой спектроскопии кристаллов ФТИ им. А.Ф. Иоффе дал положительный отзыв на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, профессором ИТМО Рождественским Юрием Владимировичем и доктором физико-математических наук, профессором, директором Центра «Информационные оптические технологии» Федоровым Анатолием Валентиновичем, утвержденном проректором по научной работе Университета ИТМО, доктором технических наук, профессором Никифоровым Владимиром Олеговичем, указала, что диссертация Дмитриева А.К. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу и 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.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они имеют ученые степени докторов наук, работают в различных организациях, не имеют ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обусловлен тем, что Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» является одним из ведущих вузов России, имеет статус национального исследовательского университета и ведет активные исследования в области, соответствующей диссертационному исследованию Дмитриева А.К.

Основное содержание диссертации представлено в 7 статьях в научных изданиях, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science (в скобках указан личный вклад соискателя):

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. – DOI: 10.1134/S1063785015110115 (Создание экспериментальной установки и проведение эксперимента, обработка экспериментальных данных, участие в подготовке публикации).
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. – DOI: 10.1364/JOSAB.33.0000B1 (Усовершенствование экспериментальной установки, разработка и создание системы из трех пар колец Гельмгольца с программным управлением, оценка чувствительности магнитометрического датчика, участие в подготовке публикации).
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. – DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012051 (Дополнение экспериментальной установки необходимой элементной базой, проведение эксперимента, участие в создании численной модели и подготовке публикации).
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. – DOI: 10.1007/s00723-018-1075-1 (Проведение эксперимента и обработка экспериментальных данных, трактовка полученных результатов, участие в подготовке публикации).
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. – DOI: 10.1103/PhysRevA.100.011801 (Проведение эксперимента, обработка полученных данных, участие в подготовке публикации).
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. – DOI: 10.1109/LSENS.2019.2957328 (Получение необходимых экспериментальных данных для оценки предполагаемой чувствительности к вариациям СВЧ поля, участие в подготовке публикации).
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. – DOI: 10.1134/S1063784220080216 (Проведение эксперимента, обработка полученных данных, участие в трактовке результатов и подготовке публикации).

На автореферат поступило 5 отзывов.

Отзыв доктора физико-математических наук, доцента, заведующего кафедрой физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Апушкинского Евгения Геннадьевича положительный и содержит 1 замечание:

- Автореферат диссертации производит хорошее впечатление, однако не лишен недостатков. Например, в тексте встречаются величины, представленные в различных единицах измерения.

Отзыв кандидата физико-математических наук, научного сотрудника Кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии Научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" Солтамова Виктора Андреевича положительный и замечаний не содержит.

Отзыв кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории Микроволновой спектроскопии кристаллов ФТИ им. А.Ф. Иоффе Бадаляна Андрея Гагиковича положительный и замечаний не содержит.

Отзыв кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории стандартов частоты Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук Величанского Владимира Леонидовича положительный и содержит 3 замечания:

- «Направленная модуляция», на мой взгляд неудачный термин, но он заменяет гораздо более протяженный вариант: «модуляция направленного определенным образом магнитного поля».
- Когда обсуждается двухчастотный резонанс или спектр, следовало бы уточнять о функции какой из частот идет речь, это не всегда сразу ясно и контекста.
- Желание представить в автореферате большой объем экспериментальных измерений привело к перенасыщенности части приведенных в нем графиков и большому их числу, что обусловило их малые размеры и микро-шрифты, затрудняющие восприятие информации.

Отзыв доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника – заведующего Лабораторией наземных геомагнитных исследований Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук Копытенко Юрия Анатольевича положительный и содержит 1 замечание:

- Автореферат написан хорошим языком, удобно структурирован, среди недостатков можно выделить, возможно, излишний объем.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем исследований получен ряд важных результатов, а именно:

1. Разработан лабораторный прототип трехкомпонентного квантового магнитометрического датчика сверхвысокого разрешения, характеризующегося чувствительностью к компонентам вектора магнитного поля в полосе частот 0 – 100 Гц на уровне $1.5 \text{ нТл/Гц}^{1/2}$ при объеме чувствительного элемента всего 0.01 мм^3 . Были реализованы метод разрешения перекрывающихся резонансных линий и методика комбинированного СТС возбуждения ОДМР.
2. Обнаружены и исследованы ультразвукие ($\sim 7 \text{ кГц}$) резонансы, соответствующие изменению проекции спина ядра ^{14}N при одночастотном ВЧ возбуждении. Этот механизм может быть использован при создании простой и компактной схемы управления ядерным спином в задачах квантовых вычислений, а также при

разработке новых магнитометрических схем, не использующих СВЧ поля, что существенно в задачах биологии и медицины.

3. Обнаружены и исследованы высококонтрастные магнитонезависимые ОДМР резонансы в сверхтонкой структуре NV центра в слабых и нулевых магнитных полях, наблюдаемые при двухчастотном СВЧ+ВЧ возбуждении. Численное моделирование, проведенное в университете Корнелла на основе полученных данных, показало, что наблюдаемые 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.
4. Предложено использование наблюдаемых высококонтрастных магнитонезависимых двухчастотных резонансов в спектрах ОДМР в схемах стабилизации частоты, требующих компактности и устойчивости к механическим воздействиям.
5. Обнаружен и исследован эффект магнитоиндуцированного поглощения радиочастотного высокочастотного излучения, регистрируемого методом ОДМР, на основе которого может быть создан скалярный магнитометрический датчик слабого (< 0.1 мТл) поля, характеризующийся чувствительностью $3.6 \text{ нТл/Гц}^{1/2}$ при мощности накачки $\sim 15 \text{ мВт}$ и объеме чувствительного элемента 0.01 мм^3 .

Научная и практическая значимость работы обусловлены с одной стороны предложенными в работе идеями и реализованными методами, которые способствуют развитию практического применения NV центров в качестве компактных датчиков магнитного поля. К ним можно отнести впервые реализованный для NV центра метод комбинированного возбуждения, позволяющий в три раза увеличить чувствительность магнитометрического датчика к отдельной компоненте вектора магнитного поля, а также идеи использования магнитонезависимых резонансов в качестве стандартов частоты и эффекта магнитоиндуцированного поглощения радиочастотного ВЧ поля для реализации магнитометрического датчика ультра слабых магнитных полей. С другой стороны результатами экспериментальных исследований, позволяющих углубить понимание механизмов, происходящих в энергетической структуре NV центров. Такими результатами являются теоретическое обоснование наблюдаемых при двухчастотном возбуждении ОДМР резонансов, основанное на расщеплении Аутлера-Таунса в нулевом магнитном поле и наблюдение узкого пика в

ОДМР спектре при одночастотном ВЧ возбуждении, свидетельствующего о возможности управления ориентацией ядерного спина оптическими методами и требующее теоретического обоснования.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием широко применимого метода ОДМР, а также реализацией как новых, так и уже зарекомендовавших себя методик возбуждения и регистрации магнитного резонанса. Все эксперименты проводились с использованием сертифицированного оборудования, а обработка экспериментальных данных, опираясь на стандартные математические алгоритмы. Также достоверность подтверждается согласием результатов эксперимента и численного моделирования, сопоставлением с теоретическими и экспериментальными результатами, полученными другими исследователями.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных, разработке, создании и усовершенствовании экспериментальной установки, написании программ автоматизации, проведении эксперимента и обработке полученных в эксперименте данных. Также автор принимал участие в интерпретации полученных экспериментальных данных.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 7 докторов по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 21, против – 0, воздержавшихся – 0.

На заседании 7 октября 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Дмитриеву А.К. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Председатель
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Васютинский Олег Святославович

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Белашов Андрей Владимирович