

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе по научной работе,

доктор физ.-мат. наук П.Н. Брунков



«27» октября 2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук  
на диссертационную работу Сошенко Владимира Владимировича  
«Прецизионная спектроскопия сверхтонких переходов в азотно-  
вакансионных центрах в алмазе для квантовой сенсорики», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.6 – Оптика**

Диссертационная работа Сошенко Владимира Владимировича «Прецизионная спектроскопия сверхтонких переходов в азотно-вакансионных центрах в алмазе для квантовой сенсорики» посвящена исследованию стабильности частот сверхтонких переходов основного состояния отрицательно заряженного азотно-вакансионного центра ( $NV^-$  центра) в интересах создания сенсора вращения на базе ядерного спина азота в алмазе.

$NV^-$  центр в алмазе является многообещающей платформой для создания компактных, прецизионных и работающих при комнатной температуре квантовых сенсоров. Большое число научных работ посвящено разработке датчиков температуры, магнитного и электрических полей, механического напряжения с использованием  $NV^-$  центров в алмазе. Отличительными особенностями таких сенсоров являются возможность работы при комнатной температуры и компактность благодаря плотной упаковке центров окраски в решетке алмаза. Наличие ядерного спина азота, присутствующего в решетке алмаза вместе с возможностью оптического детектирования частоты ядерного магнитного резонанса открывает возможность создания динамического гироскопа на базе  $NV^-$  центров. Такой гироскоп благодаря высоким концентрациям активных центров в алмазе в



перспективе может оказаться одновременно и компактным, и высокоточным, что позволит применять его в инерциальных навигационных системах малого размера, востребованных в нефтедобывающей индустрии, транспортной и космической сфере. Тема диссертации несомненно востребована для развития квантовых сенсоров, в частности создания гироскопов на новых принципах.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 107 страниц машинописного текста, 43 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 68 наименований.

Во **Введении** сформулированы цели, задачи, актуальность, новизна и практическая значимость результатов работы, приведена методология исследования, личный вклад автора и данные об апробации работы.

**Первая глава** посвящена принципу измерения угловой скорости вращения установки с использованием ансамблей ядерных спинов  $NV^-$  центра и созданию экспериментальной установки для демонстрации данного принципа. Приведено описание структуры энергетических уровней  $NV^-$  центра, принципов оптической накачки  $NV^-$  центра, динамической поляризации ядерного спина и измерения населенностей на сверхтонких подуровнях основного состояния  $NV^-$  центра. Разработаны и исследованы два варианта резонаторов для возбуждения магнитных переходов на основном состоянии  $NV^-$  центра: квазигельмгольцевский и керамический. Также разработана конструкция двухчастотного резонатора для возбуждения сверхтонких переходов на основном состоянии  $NV^-$  центра. Работоспособность созданных резонаторов была продемонстрирована путем наблюдения осцилляций Раби. Разработана установка для исследования стабильности частот сверхтонких переходов, в состав которой вошли квазигельмгольцевский и двухчастотного резонаторы. Была продемонстрирована работа алгоритма динамической поляризации для ансамбля ядерных спинов  $NV^-$  центров, в результате было показано, что населенность на сверхтонком подуровне  $m_I=0$  составляет 80%.

**Вторая глава** посвящена исследованию температурного дрейфа постоянных сверхтонкой структуры  $NV^-$  центра. Описан эксперимент по измерению частот сверхтонких переходов с помощью оптически-детектируемого ядерного магнитного резонанса. По измерению четырёх частот вычисляется величина квадрупольного расщепления и продольной компоненты тензора сверхтонкого взаимодействия. Для уменьшения систематической ошибки измерения температуры алмаза определение



температуры осуществлялось по температурному сдвигу частот магнитных переходов исследуемого ансамбля  $NV^-$  центров, который был предварительно тарирован помещением алмаза в термостат. В результате были определены температурные коэффициенты для квадрупольного расщепления и продольной компоненты тензора сверхтонкого взаимодействия:  $40 \pm 2$  Гц/К и  $198 \pm 11$  Гц/К соответственно.

**Третья глава** посвящена регистрации сдвигов частот сверхтонких переходов, вызванных вращением алмаза. С учётом результатов **второй главы** была выбрана пара переходов, разность частот между которыми нечувствительна к изменению температуры, но чувствительна ко вращению. Разработан оригинальный метод, позволяющий измерить разность частот без опроса каждого из переходов. Влияние магнитного поля на измеренный сдвиг частот было скомпенсировано по показаниям магнитометра с использованием того же ансамбля  $NV^-$  центров. В результате вращения установки со скоростями в диапазоне  $\pm 100$  град/с было зарегистрировано изменение частоты сверхтонких переходов. Стабильность измерения сдвига частоты составила  $4 \cdot 10^{-6}$ .

**Четвертая глава** посвящена измерению продольной релаксации населенностей сверхтонких подуровней основного состояния  $NV^-$  центра. Время продольной релаксации составило 44 секунды при магнитном поле 1 мТл. Время продольной релаксации существенно меньше времени затухания когерентности (2.4 мс), полученное в Главе 3, и таким образом не ограничивает чувствительность сенсора вращения на  $NV^-$  центре.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе. В двух приложениях вынесены вспомогательные материалы о Гамильтониане основного состояния  $NV^-$  центра и расчете поправок второго порядка из теории возмущения к энергиям подуровней основного состояния.

К основным результатам работы можно отнести следующие:

1. Разработана и реализована установка для исследования стабильности сверхтонких переходов основного состояния ансамбля  $NV^-$  центров. Продемонстрировано возбуждение сверхтонких и электронных магнитных переходов. Также продемонстрирован алгоритм динамической поляризации ядерного спина.
2. Исследованы температурные зависимости постоянных, определяющих частоты сверхтонких переходов основного состояния  $NV^-$  центра, а именно квадрупольного расщепления и продольной компоненты сверхтонкого расщепления. Измерения произведены в диапазоне температур от 325 до 370 К.



Определенные температурные коэффициенты равны  $40 \pm 2$  Гц/К и  $198 \pm 11$  Гц/К для квадрупольного расщепления и продольной компоненты тензора сверхтонкого взаимодействия соответственно.

3. Разработан протокол возбуждения переходов в  $NV^-$  центрах, с помощью которого был измерен сдвиг частоты сверхтонких переходов основного состояния, вызванного вращением установки с алмазом в пространстве. При помощи подготовки суперпозиционного состояния сверхтонких подуровней с проекцией ядерного спина +1 и -1 была определена разность частот двух сверхтонких переходов, которая не зависит от температуры. Также исключено влияние магнитного поля на измерение путём опроса частот электронных магнитных переходов основного состояния  $NV^-$  центров.

4. Впервые измерен сдвиг частоты сверхтонких переходов, связанный с вращением установки с ансамблем  $NV^-$  центров в пространстве. Вращение установки производилось со скоростями в диапазоне  $\pm 100$  градусов/секунду. Влияние флуктуаций магнитного поля на измеренный сдвиг было скорректировано на показания магнитометра, реализованного с использованием того же ансамбля магнитометра, реализованного с использованием того же ансамбля  $NV^-$  центров. Стабильность измерения частоты перехода составила  $4 \cdot 10^{-6}$ .

5. Измерено время продольной релаксации населенностей ядерных магнитных подуровней  $NV^-$  центров. Время продольной релаксации составило 44 секунды при магнитном поле 1 мТл, необходимом для выделения резонансов одной из четырех ориентаций  $NV^-$  центров. Продольная релаксация не является ограничивающим фактором для чувствительности сенсоров, использующих сверхтонкие переходы основного состояния  $NV^-$  центров.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты. Результаты диссертации прошли серьезную апробацию на международных конференциях и симпозиумах. Результаты опубликованы в 5 статьях, входящих в базу WOS и Scopus (включая зарубежные журналы). Также были зарегистрированы 2 патента.

Полученные в работе результаты представляют значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и для практического применения. Следует отметить высокий экспериментальный уровень проведенный автором исследований, детальную проработку каждого эксперимента и тщательный анализ результатов.



Результаты диссертации могут быть использованы рядом организаций, задействованных в разработке и производстве навигационного оборудования, а именно: предприятиями ГК «РосТех», ООО "Гиролаб", ПАО «ПНППК», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и другими.

Несмотря на общий высокий уровень, диссертационная работа В.В. Сошенко не лишена незначительных недостатков. В частности, следует отметить следующее:

1. В работе наряду с единицами СИ (тесла) используются единицы СГС (гауссы).
2. На стр. 27 диссертации сказано: «Например, частота перехода ... и ... составляет всего 6 кГц». Очевидно, имеется в виду не частота перехода, а разница частот переходов.
3. На рисунке 1.10 (стр.34) отсутствуют обозначения по оси ординат.
4. В подписи к рисунку 1.11 (стр.35) сказано: «Значения осей соответствуют размерам ансамбля цилиндрической формы». Это предложение необходимо пояснить.
5. На стр. 31 диссертации упомянуты «резонаторы для возбуждения тонких переходов». На самом деле переходы, возбуждаемые в NV центре в СВЧ диапазоне, не являются «тонкими», а относятся к чисто электронным.
6. Результат 4 работы (стр.88) сформулирован следующим образом: «Стабильность измерения частоты перехода, скорректированного на флуктуации внешнего магнитного поля, составила  $6 \cdot 10^{-6}$ ». Очевидно, здесь необходимо употребить термин «погрешность измерения» или аналогичный.
7. Ряд предложений в диссертации характеризуется стилистическими погрешностями, например: «Динамический ядерный гироскоп основан на другой принципе» (стр.12), «Вакансии в решетки алмаза получают при облучение кристалла» (стр.16), «Для определение частоты перехода контур были аппроксимированы» (стр.50) и т.д.
8. Два раздела диссертации заканчиваются на середине фразы (стр.69 и стр.70).

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости ее вклада в развитие квантовых технологий.

Диссертация Сошенко Владимира Владимировича «Прецизионная спектроскопия сверхтонких переходов в азотно-вакансионных центрах в алмазе для квантовой сенсорики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор,



Сошенко Владимир Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика.

Диссертация была заслушана и обсуждена 27.09.2022 года на совместном семинаре лаб. Микроволновой спектроскопии кристаллов (зав. лаб. П. Г. Баранов) и лаб. Атомной радиоспектроскопии (зав. лаб. Е. Б. Александров) федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук. На заседании присутствовало 21 специалистов, среди них 3 доктора наук, 12 кандидатов наук, аспиранты, студенты. Отзыв обсуждался и рекомендован к утверждению протоколом № 2 от 27 сентября 2022 года.

Отзыв ведущей организации подготовил:

ведущий научный сотрудник лаборатории

Атомной радиоспектроскопии

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, д.ф.-м.н.

Email: pavel.baranov@mail.ioffe.ru



Вершовский

Антон Константинович

Председатель семинара:

Заведующий лабораторией

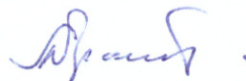
Микроволновой спектроскопии кристаллов,

главный научный сотрудник

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

д.ф.-м.н., проф.

Email: antver@mail.ioffe.ru



Баранов

Павел Георгиевич



**Список основных работ** сотрудников ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. M.V. Petrenko, A.S. Pazgalev, and A.K. Vershovskii. Quantum optical magnetic field sensor for new generation neurodiagnostic systems - Quantum Electronics v.52, no.2, pp. 119-126 (2022).
2. A.E. Ossadtchi, M.V. Petrenko, A.S. Pazgalev, and A.K. Vershovskii. Promising Versions of Non-Zero Magnetic Field Optical Sensors for Magnetoencephalography - International Journal of Psychophysiology v.168, p.S120 (2021)
3. Hyperfine and nuclear quadrupole splitting of the NV ground state in 4H-SiC
4. F.F. Murzakhanov, B.V. Yavkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, H.J. von Bardeleben, T. Biktagirov, U. Gerstmann, V.A. Soltamov Phys. Rev. B 103, iss. 12, #245203 (2021)
5. A.K. Dmitriev, A.K. Vershovskii. Weak magnetic field sensor based on nitrogen-vacancy color centers in a diamond crystal – Technical Physics, v.65, no.8, 1301–1306 (2020).
6. A.K. Dmitriev, A.K. Vershovskii. Ultra-Narrow Low-Field Nuclear Spin Resonance in NV Centers in a Bulk Diamond Crystal - Applied Magnetic Resonance v.50, no 4, pp. 599-604 (2019)
7. A.K. Vershovskii, Yu.A. Litmanovich, A.S. Pazgalev, V.G. Peshekhonov. Nuclear magnetic resonance gyroscope: the ultimate parameters - Gyroscopy Navig. Vol. 9, No. 3, pp. 162–176 (2018)

### **Информация о ведущей организации**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Электронная почта: [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

Факс: (812) 297-1017

Телефон: (812) 297-2245

Сайт: <https://www.ioffe.ru>