

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Сошенко Владимира Владимировича  
«Прецизионная спектроскопия сверхтонких переходов в азотно-вакансионных центрах в  
алмазе для квантовой сенсорики», представленную на соискание  
учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.6 – оптика

Кандидатская диссертация Сошенко В.В. посвящена экспериментальному исследованию стабильности частот сверхтонких переходов основного состояния отрицательно заряженных азотно-вакансионных центров окраски в алмазе.

**Актуальность** таких исследований не вызывает сомнений. В настоящее время центры окраски в алмазе стали объектом активных исследований на предмет использования их в качестве носителей квантовой информации в системах квантовых вычислений, а также создания на их основе разнообразных сенсоров. Одним из наиболее перспективных является отрицательно заряженный азотно-вакансионный центр окраски ( $NV^-$ -центр), обладающий большим временем спиновой когерентности при комнатной температуре, допускающий использование оптически-детектируемого магнитного резонанса, приготовление спин-поляризованных состояний с помощью оптической накачки и др. Благодаря своим уникальным свойствам  $NV^-$ -центры активно используются для разработки сенсоров магнитного и электрического полей, температуры и давления. Среди возможных применений  $NV^-$ -центров – создание сенсора вращения или гироскопа – одного из ключевых элементов инерциальных навигационных систем. Благодаря высокой плотности активных ядерных спинов, твердотельные гироскопы могут быть намного компактнее, чем газовые, при том же уровне точности. Кроме того, возможность реализации на базе  $NV^-$ -центров мультисенсора (температуры, магнитного поля и др.) облегчает стабилизацию устройства в полевых условиях. В этой связи, актуальной задачей является прецизионная спектроскопия сверхтонких переходов  $NV^-$ -центров, что включает исследование температурной стабильности частот сверхтонких переходов, разработку методов измерения сдвига частоты, вызванного вращением ансамбля  $NV^-$ -центров, исследование факторов, влияющих на точность подобных измерений. Именно эти задачи и решаются в диссертационной работе.

**Научная и практическая значимость** диссертации связана с тем, что полученные в ней результаты расширяют возможности использования  $NV^-$ -центров в качестве квантовых сенсоров и показывают возможность создания на их основе компактных твердотельных гироскопов. В частности, выявленный в процессе исследования температурный дрейф постоянных сверхтонкого взаимодействия в  $NV^-$ -центре показал необходимость учета влияния температуры при проведении прецизионных измерений,

использующих сверхтонкие переходы основного состояния  $NV^-$ -центра. Важнейшим результатом работы является измеренный впервые сдвиг частоты сверхтонкого перехода  $NV^-$ -центра, вызванный вращением установки в пространстве, что открывает возможность создания компактного гироскопа на основе ансамбля ядерных спинов азота в алмазе. Подобные гироскопы востребованы в системах инерциальной навигации – единственного на сегодняшний день средства автономного определения положения и ориентации объекта в пространстве, для которого характерны полная независимость от внешних источников данных, повышенная защита от помех и высокая скрытность.

Полученные в диссертации результаты представляют интерес для специалистов, работающих в области оптической спектроскопии, радиоспектроскопии, квантовой оптики и квантовых оптических технологий, и могут быть использованы при подготовке учебных курсов в высших учебных заведениях Российской Федерации.

**Достоверность** положений и результатов диссертации обеспечивается использованием современной калиброванной измерительной аппаратуры, хорошим согласием с более поздними работами других авторов, апробацией публикациями в ведущих рецензируемых журналах и докладами на международных конференциях. Все результаты имеют простое качественное объяснение в рамках известных физических моделей квантовой оптики и атомной физики.

**Новизна** проведённых исследований и полученных результатов заключается в следующем:

- Впервые измерена температурная зависимость квадрупольного расщепления сверхтонких подуровней основного состояния ансамбля  $NV^-$ -центров;
- Впервые измерена температурная зависимость продольной компоненты тензора сверхтонкого расщепления основного состояния ансамбля  $NV^-$ -центров;
- Впервые измерен сдвиг частоты сверхтонкого перехода, вызванный вращением установки в пространстве, в ансамбле центров окраски в твердом теле;
- Впервые измерено время продольной релаксации ядерного спина азота-14 в ансамбле  $NV^-$ -центров при комнатной температуре и магнитном поле 1 мТл, достаточном для выделения резонансов одной из ориентаций  $NV^-$ -центров.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объём диссертации составляет 107 страниц машинописного текста, диссертация включает 43 рисунка и список цитируемой литературы из 68 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность диссертации, формулируются цель работы, решаемые задачи, научная новизна исследования и защищаемые положения, обсуждаются практическая значимость полученных результатов и методология



исследования. Приведены также данные об апробации результатов на международных конференциях и публикации автора по теме диссертации.

**В первой главе** рассматриваются принципы измерения угловой скорости вращения лабораторной системы отсчета с использованием ядерного спина, свойства  $NV^-$ -центров и методы подготовки и измерения населенности их сверхтонких подуровней. Приведены результаты разработки и испытания двух вариантов СВЧ-резонаторов для возбуждения электронных магнитных переходов  $NV^-$ -центров: керамического и квазигельмгольцевского, а также двухчастотного НЧ-резонатора для возбуждения сверхтонких переходов. Работоспособность последнего продемонстрирована наблюдением осцилляций Раби между сверхтонкими подуровнями. Основным результатом данной главы является создание экспериментальной установки для исследования стабильности частот сверхтонких переходов основного состояния ансамбля  $NV^-$ -центров, в состав которой входят генераторы сигналов на частоте соответствующих магнитных переходов, созданные квазигельмгольцевский СВЧ- и двухчастотный НЧ-резонаторы, система оптической накачки и сбора флюоресценции, в также система управления.

**Вторая глава** посвящена исследованию температурного дрейфа постоянных сверхтонкой структуры. Исследована температурная зависимость величины квадрупольного расщепления, а также продольной компоненты сверхтонкого расщепления основного состояния  $NV^-$ -центра в диапазоне температур 325–370 К. Для измерения температуры алмаза в качестве сенсоров также использовались  $NV^-$ -центры. В результате, для алмаза с концентрацией  $NV^-$ -центров  $3 \times 10^{15} \text{ мм}^{-3}$ , выращенного методом высоких температур и давлений, температурный коэффициент квадрупольного расщепления сверхтонких подуровней составил  $40 \pm 2 \text{ Гц/К}$ , а температурный коэффициент продольной компоненты тензора сверхтонкого взаимодействия составил  $198 \pm 11 \text{ Гц/К}$ . По результатам измерений сделан вывод о том, какие пары сверхтонких переходов необходимо использовать для измерения скорости вращения.

**В третьей главе** представлены результаты измерения скорости вращения с использованием ансамбля ядерных спинов  $NV^-$ -центров. Разработан протокол возбуждения оптических, электронных и ядерных магнитных переходов в  $NV^-$ -центре для измерения сдвига частоты сверхтонких переходов, вызванного вращением установки с алмазом в пространстве. Температурный дрейф частоты сверхтонких переходов исключен за счёт опроса разности частот двух сверхтонких переходов путем подготовки суперпозиционного состояния сверхтонких подуровней с проекцией ядерного спина +1 и -1. Коррекция на флуктуации внешнего магнитного поля выполнена с использованием магнитометра, реализованного с использованием того же ансамбля  $NV^-$ -центров. В результате, впервые измерен сдвиг частоты сверхтонких переходов, вызванный вращением установки с ансамблем  $NV^-$ -центров в пространстве. Вращение установки производилось со

скоростями в диапазоне  $\pm 100$  град/с, а средняя ошибка измерения составляла 11 град/с при времени усреднения 60 с. При этом стабильность измерения частоты перехода, равная отношению средней ошибки к частоте выбранного перехода, составила  $4 \times 10^{-6}$ .

**Четвёртая глава** посвящена измерению времени продольной релаксации ядерного спина  $NV^-$ -центра. Зависимость спектра ОДМР от времени задержки между приготовлением и измерением состояния ядерных подуровней позволила определить время релаксации населенностей ядерных подуровней, среднее значение которого оказалось равным 43 с, в алмазе с концентрацией  $NV^-$ -центров  $2 \times 10^{14}$  мм<sup>-3</sup> при величине магнитного поля 1 мТл. Сделан вывод о том, что релаксация населенностей сверхтонких подуровней не вносит существенный вклад в распад когерентности между ядерными подуровнями, неоднородное время жизни которой составляет 2.4 мс.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. В диссертации практически нет информации о характеристиках используемых образцов алмазов. В частности, концентрация  $NV^-$ -центров приводится только в защищаемых положениях, при этом выясняется, что она более чем на порядок отличается в разных экспериментах. Сравнение остальных параметров у используемых образцов не представляется возможным, в силу чего требуется дополнительное обоснование того, что результаты первых двух глав можно использовать в третьей и четвертой главе.
2. В таблице 5 (стр. 79), где приводятся результаты измерения скорости вращения, ошибка измерения во многих случаях меньше, чем разность фактической и измеренной скоростей. Возможно ситуация улучшается при использовании масштабного коэффициента, однако простое его применение не согласуется с рис. 3.11, где аппроксимация прямой не проходит через ноль. В этой связи, требуются дополнительные пояснения.
3. В защищаемых положениях (стр. 8) и в тексте главы 3 (стр. 77) стабильность измерения сдвига частоты оценивается как  $4 \times 10^{-6}$ , в то время как в результатах третьей главы (стр.81) и в результатах диссертации (стр. 88) приводится значение  $6 \times 10^{-6}$ .

Тем не менее, эти замечания не носят принципиального характера и не снижают научной значимости работы. Диссертация представляет собой цельное и законченное научное исследование, содержание которого соответствует целям работы и названию диссертации. Все защищаемые научные положения, выводы и рекомендации хорошо обоснованы. Работа характеризуется необходимой новизной и достоверностью полученных результатов. По теме диссертации опубликовано пять работ в высокорейтинговых международных научных журналах и зарегистрировано два патента, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных научных конференциях. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.



На основании вышесказанного считаю, что содержание работы и форма ее представления полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Сошенко Владимир Владимирович, обладает высокой квалификацией и, несомненно, достоин присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – оптика.

Официальный оппонент:

Калачев Алесей Алексеевич, доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.05 – оптика, доцент по специальности 01.04.05 – оптика, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Эл. почта: [a.kalachev@knc.ru](mailto:a.kalachev@knc.ru), раб. тел. (843)2319000.

  
 А. А. Калачев  
24.10.22

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Адрес: 420011, Казань, ул. Лобачевского, 2/31.

<http://www.knc.ru>, эл. почта: [presidium@knc.ru](mailto:presidium@knc.ru), тел. (843)2319000

### Список публикаций

официального оппонента А.А. Калачева в рецензируемых научных изданиях по тематике диссертации В.В. Сошенко "Прецизионная спектроскопия сверхтонких переходов в азотно-вакансионных центрах в алмазе для квантовой сенсорики" за последние пять лет

- [1] С.Н. Андрианов, Н.С. Андрианова, Ф.М. Аблаев, А.А. Калачев, Ю.Ю. Кочнева, А.В. Шкаликов, Известия Российской академии наук. Серия физическая // Т. 85. № 12. С. 1761-1764 (2021).
- [2] D.A. Turaykhanov, D.O. Akat'ev, A.V.Vasiliev, F.M. Ablayev, A.A. Kalachev, Quantum hashing via single-photon states with orbital angular momentum // Physical Review A, 104(5), 052606 (1-8) (2021).
- [3] A.A. Shukhin, J. Keloth, K. Nakuta, A.A. Kalachev, Heralded single-photon and correlated-photon-pair generation via spontaneous four-wave mixing in tapered optical fibers // Physical Review A, 101(5), 053822(1-7) (2020).
- [4] X. Zhang, W.-T. Liao, A. Kalachev, R. Shakhmuratov, M. Scully, O. Kocharovskaya. Nuclear quantum memory and time sequencing of a single  $\gamma$ -photon // Physical Review Letters, 123(25), 250504(1-5) (2019)
- [5] A. Kalachev, A. Berezhnoi, P. Hemmer, O. Kocharovskaya. Raman quantum memory based on an ensemble of silicon-vacancy centers in diamond. Laser Physics, 29(10), 104001(1-5) (2019)
- [6] N. Kukharchyk, D. Sholokhov, O. Morozov, S.L. Korableva, A.A. Kalachev, P.A. Bushev. Optical coherence of  $^{166}\text{Er}:7\text{LiYF}_4$  crystal below 1 K // New Journal of Physics, 20, 023044(1-11) (2018)
- [7] D.A. Kalashnikov, E.V. Melik-Gaykazyan, A.A. Kalachev, Y. F. Yu, A.I. Kuznetsov, L.A. Krivitsky. Quantum interference in the presence of a resonant medium // Scientific Reports, V.7(1), 11444(1-8) (2017)