

ОТЗЫВ

официального оппонента Кулика Сергея Павловича на диссертацию 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

Диссертация В.В.Сошенко посвящена исследованию стабильности частот сверхтонких переходов основного состояния отрицательно заряженного азотно-вакансионного центра окраски в алмазе. Фактически, речь идет о решении задачи построения высокоточных и компактных твердотельных устройств квантовой гироскопии, которые по своим характеристикам призваны превзойти параметры соответствующих классических устройств. Для этого в работе решается пять взаимно связанных экспериментальных и теоретических задач:

- создание экспериментальной установки для исследования стабильности частот сверхтонких переходов основного состояния ансамбля NV⁻ центров;
- исследование температурной зависимости величин постоянных квадрупольного и сверхтонкого расщепления основного состояния ансамбля NV⁻ центров;
- формирование последовательности управляющих импульсов для возбуждения оптических, электронных магнитных и сверхтонких переходов в ансамбле NV⁻ центров для измерения стабильности частоты сверхтонких переходов в ансамбле NV⁻ центров с возможностью исключения температурной зависимости;
- измерение смещения частот сверхтонких переходов в ансамбле NV⁻ центров, обусловленное вращением установки в пространстве;
- выполнение оценки влияния продольной релаксации населенности ядерных подуровней на точность измерения частот сверхтонких переходов ансамбля NV⁻ центров.

Разработки в области квантовых сенсоров сегодня стали одним из бурно развивающихся направлений сквозной технологии «Квантовые технологии» - наряду с двум другими тесно связанными направлениями «Квантовые вычисления» и «Квантовые коммуникации». На мой взгляд, квантовая сенсорика – наиболее перспективная субтехнология, поскольку именно здесь имеется несколько разработок, которые в короткие сроки довести до конечных продукт, востребованных в навигации, медицине, логистике, геологоразведке и др. отраслях. Создание квантового гироскопа – научная проблема, которая давно привлекает исследователей. До сих пор ведутся споры о том, возможно ли построение квантового устройства, которое по своим параметрам (чувствительность, энергопотребление, массогабариты, удобство эксплуатации и др.) превзойдет соответствующий классический аналог. В диссертации В.В.Сошенко делается еще один шаг в решении этой проблемы.

В этой связи, тема диссертационной работы В.В.Сошенко, безусловно, является актуальной. Диссертация имеет существенную практическую значимость в контексте ведущихся разработок в области построения чувствительно квантового сенсора на основе ансамбля NV⁻ центров в алмазной пластине, искусственно выращенной методом высокого давления и температуры.

Отмечу высокий уровень экспериментальных работ, выполненных в диссертации. Вообще, работа по исследованию переходов между сверхтонкими и электронными магнитными подуровням и измерением частотных сдвигов сверхтонких переходов, вызванных вращением установки с ансамблем NV⁻ центров в пространстве, требует незаурядных экспериментальных навыков и хорошей теоретической подготовки. Выполнение экспериментов сопровождается многочисленными и тщательными

калибровками установки, например, величины электронного спин-спинового расщепления по температуре, что квалифицированно изложено в тексте диссертации. Также не могу не отметить хороший стиль написания диссертации – все по существу и, как говорится, «без воды» - редкое явление для сегодняшней ситуации в науке. Из результатов диссертации выделю:

- эlegantный прием исключения температурного сдвига частоты сверхтонких переходов за счёт опроса разности частот двух сверхтонких переходов путем подготовки суперпозиционного состояния сверхтонких подуровней с проекциями ядерного спина ± 1 ;
- измерение частотного сдвига сверхтонких переходов, вызванного вращением установки с ансамблем NV⁻ центров в пространстве (диапазон скоростей составил ± 100 градусов/секунду, стабильность измерения частоты перехода, составила $4 \cdot 10^{-6}$). При этом была введена автокоррекция флуктуаций внешнего магнитного поля при помощи магнитометра, реализованного с использованием того же ансамбля NV⁻ центров.

Также обращаю внимание, что поскольку работа имеет метрологическую направленность, в ней достаточно подробно описаны все экспериментальные величины, которые тем или иным образом исследовались. Это ярко подтверждается в «Положениях, выносимых на защиту», где четко указаны и сами величины, и границы, в пределах которых они исследовались.

Данные результаты могут быть использованы целым рядом научно-технических организаций при построении квантовых твердотельных гироскопов для задач навигации, таких как, АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», «Специальные Системы. Фотоника», предприятиями ГК РосТех, АО РКС, ИЛФ СО РАН, НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, ФИАН и другими.

Диссертация состоит из введения, четырех оригинальных глав, заключения и списка литературы. В первую главу также включен обзор литературы по применению ядерного спина NV⁻ центра для задач гироскопии. Общий объем работы составляет 107 страниц, включая два Приложения, 43 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 68 наименований.

Введение посвящено аргументации актуальности темы исследования, а также формулировке цели и задач работы, научной новизне, практической значимости, методологии и методам исследований, положений, выносимых на защиту, а также информации об апробации и публикациях по теме диссертации.

В первой Главе диссертации – наиболее объемной - сделан литературный обзор по динамическим гироскопам, методам исследованию ансамблей NV⁻ центров, а также способам возбуждения электронных магнитных и сверхтонких переходов в них.

Здесь же подробно описана экспериментальная установка для исследования стабильности частот сверхтонких переходов основного состояния ансамбля NV⁻ центров. Продемонстрированы осцилляции Раби между сверхтонкими и электронными магнитными подуровнями. Основной результат состоит в том, что используя алгоритм динамической поляризации ядерного спина, была получена населенность 80 % на ядерном магнитном подуровне $m_I = 0$. Подробно обсуждаются конструкции и характеристики собранных резонаторов и схем для их возбуждения.

Вторая Глава посвящена методам исследования температурной зависимости сверхтонкой структуры NV⁻ центра. Значительная содержательная часть этой главы (параграф 2) относится к обсуждению и оценке погрешностей проводимых измерений – за счет неоднородности образца, случайным ошибкам моделей аппроксимации, ошибкам, вызванным наличием недиагональных членов Гамильтониана, влияния температурного дрейфа сверхтонкой структуры и др.

Основным результатом Главы 3 является, несомненно, предложенный протокол

измерения скорости вращения, иллюстрированный на Рис. 3.8. Как отмечено выше, был использован оригинальный прием, связанный с автокоррекцией флуктуаций магнитного поля при помощи магнитометра, реализованного с использованием того же ансамбля NV⁻ центров.

Четвертая Глава посвящена проблеме измерения времени релаксации населенности сверхтонких подуровней основного состояния NV⁻ центра. Была разработана соответствующая методика и описана экспериментальная процедура (Рис.4.1). Считая, что распад населенности имеет экспоненциальный характер, полученная зависимость населенности $P(t)$ сверхтонкого подуровня $m_I = 0$ от времени задержки t аппроксимирована экспоненциальной функцией нелинейным методом наименьших квадратов.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы. В приложения А и Б вынесены вспомогательные материалы по Гамильтониану основного состояния NV⁻ центра и поправкам второго порядка к уровням энергии основного оптического состояния NV⁻ центра.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

- Поскольку в диссертации речь идет о разработке гироскопов нового поколения, основанных на эффекте изменения частоты сверхтонких переходов, хотелось бы видеть обсуждение их преимуществ по сравнению с классическими (в том числе, микроэлектромеханическими, лазерными и оптоволоконными) гироскопами и сравнение прогнозируемых и реально имеющих характеристик этих устройств. Наверное, имело бы смысл сравнить основные параметры, поместив их в сводную таблицу.
- К сожалению, в работе не уделяется достаточно внимания обсуждению того, насколько чувствительны параметры квантового гироскопа к другим внешним воздействиям кроме вращения и температуры.
- В Главе 2 при описании экспериментальных температурных зависимостей частотных сдвигов (Рис. 2.7, 2.8 и 2.9) я не нашел обсуждения соответствующих теоретических зависимостей, хотя на стр. 56 упоминается линейная аппроксимация зависимости частот сверхтонких переходов основного оптического состояния NV⁻ центра от температуры. Это же замечание относится и к результатам Главы 3, где, в частности, приводятся график зависимости сигнала биений на частоте запрещенного перехода между сверхтонкими подуровнями $m_I = +1$ $m_I = -1$ электронного магнитного подуровня $m_S = 0$ от задержки между π -импульсами (Рис.3.2).
- В Главе 4 обсуждении методики измерения и экспериментов по измерению времен релаксации населенностей сверхтонких подуровней непонятно, отличаются ли эти времена от образца к образцу и/или в пределах одного образца и как такая неоднородность (если она имеется) влияет на интегральную чувствительность квантового гироскопа.

Данные замечания носят рекомендательный характер, не затрагивают основных положений работы и общую положительную оценку диссертации.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus (включая статьи в высокорейтинговых журналах Physical Review Letters, Physical Review B, а также престижных отечественных журналах Письма в ЖЭТФ, Квантовая электроника и Краткие сообщения по физике Физического института имени П.Н. Лебедева), 2 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 2 патента.

Стоит также отметить высокий научно-технический уровень работы, логическое

структурирование текста, ясность изложения и достаточный литературный обзор по теме диссертации. Еще раз отмечу, что стиль изложения материалов диссертации лаконичен и достаточен для понимания, что свидетельствует и о высоком профессионализме В.В.Сошенко как экспериментатора, и о способности соискателя излагать собственные мысли. На мой взгляд это является проявлением той самой квалификации, подтверждением которой служит присвоение искомой степени.

Заключение

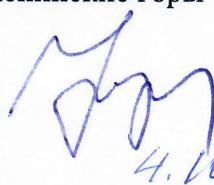
Оценивая диссертационную работу Сошенко Владимира Владимировича в целом, можно заключить следующее:

- тема диссертации актуальна, заключения, научные выводы и рекомендации диссертации научно обоснованы;
- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;
- достоверность результатов работы подтверждается согласием экспериментальных данных и выводов, сделанных на основании теоретических моделей, а также воспроизводимостью экспериментальных данных и использованием апробированных и протестированных измерительных приборов;
- диссертация Сошенко Владимира Владимировича 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.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., Кулик Сергей Павлович,
научный руководитель Центра квантовых технологий,
профессор кафедры квантовой электроники физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 35.

тел.: 7-(910)484-06-22
e-mail: sergei.kulik@physics.msu.ru



/Кулик Сергей Павлович/

4.10.2022

Подпись Кулика Сергея Павловича удостоверяю:

Сысоев Николай Николаевич,
декан физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,
профессор
Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 2.
тел.:7-(495) 939-31-60



/Сысоев Николай Николаевич/

Список публикаций

официального оппонента С.П. Кулика 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] К. Г. Катамадзе, А. В. Пащенко, А. В. Романова, С. П. Кулик, Генерация и применение широкополосных бифотонных полей. Письма в ЖЭТФ, том 115, выпуск 10, 613-628 (2022).
- [2] Y.V. Kartashov, A.A. Arkhipova, S.A. Zhutavitskii, N.N. Skryabin, I.V. Dyakonov, A.A. Kalinkin, **S.P. Kulik**, V.O. Kompanets, S.V. Chekalin, L. Tomer, and V.N. Zadkov, Observation of edge solitons in topological trimer arrays, Phys. Rev. Lett. 128, 093901 (2022);
- [3] L. V. Gerasimov, R. R. Yusupov, I. B. Bobrov, D. Shchepanovich, E. V. Kovlakov, S. S. Straupe, **S. P. Kulik**, and D. V. Kupriyanov, Dynamics of a spin qubit in an optical dipole trap, Phys. Rev. A 103, 062426-29 (2021);
- [4] S. Kuzmin, I. Dyakonov, **S. Kulik**, Architecture agnostic algorithm for reconfigurable optical interferometer programming. Optics Express, 29(23), 38429-38440 (2021);
- [5] Fldzhyan Suren A., Saygin Mikhail Yu, **Kulik Sergei P.**, Compact linear optical scheme for Bell state generation, Physical Review Research, 3, 043031 (2021);
- [6] Teo Yong Siah; Shin Seongwook; Jeong Hyunseok; Kim Yosep; Kim Yoon-Ho; Struchalin Gleb; Kovlakov Egor; Straupe Stanislav; **Kulik S. P.**; Leuchs Gerd; Sanchez-Soto Luis, Benchmarking quantum tomography completeness and fidelity with machine learning, New Journal of Physics, 23, 103021 (2021);
- [7] O.V. Borzenkova, G.I. Struchalin, A.S. Kardashin, V.V. Krasnikov, N.N. Skryabin, S.S. Straupe, S.P. Kulik, J.D. Biamonte, Variational Simulation of Schwinger's Hamiltonian with Polarisation Qubits, Applied Physics Letters, 118, 144002 (2021);
- [8] L.V. Gerasimov, R.R. Yusupov, I.B. Bobrov, D. Shchepanovich, E.V. Kovlakov, S.S. Straupe, **S.P. Kulik**, and D.V. Kupriyanov, Dynamics of a spin qubit in an optical dipole trap, Phys. Rev. A 103, 062426 (2021);
- [9] M.M. Minnegaliev, I.V. Dyakonov, K.I. Gerasimov, A.A. Kalinkin, **S.P. Kulik**, S.A. Moiseev, M.Yu Saygin, and R. V. Urmancheev. Observation and investigation of narrow optical transitions of $^{167}\text{Er}^{3+}$ ions in femtosecond laser printed waveguides in $^7\text{LiYF}_4$ crystal, Laser Physics Letters, 15, 045207 (6pp) (2018);