

УТВЕРЖДАЮ
Проректор, начальник Управления
научной политики Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»,
доктор физ.-мат. наук, профессор
А. А. Федянин



«29» _____ 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Большедворского Степана Викторовича

«Исследование центров окраски в наноалмазах и их агрегатах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»

Диссертация С.В.Большедворского посвящена экспериментальным исследованиям оптических и когерентных свойств одиночных вакансионных азотных и кремниевых центров окраски в синтетических наноалмазах при комнатной температуре.

Актуальность работы трудно переоценить, поскольку речь идет об одном из принципиальных физических свойств многообещающего для развития квантовых технологий объекта – нанокристаллов алмаза с вакансионными центрами окраски. Речь идет об оптической когерентности - свойстве, которое, фактически, определяет использование таких структур в современных технологиях на уровне одиночных квантовых объектов. В частности, в работе разрабатываются экспериментальные подходы синтеза и использования вакансионных центров окраски наноалмазов в качестве квантовых логических элементов, источников неклассического излучения и прецизионных сенсоров.

В работе, безусловно, представлены новые оригинальные результаты как в области технологии изготовления и подготовки наноалмазных образцов, так и по исследованию их радиационных свойств и времен релаксации. Отмечу, что одним из центральных мест в диссертационной работе является создание соответствующей экспериментальной установки, которая позволила проводить исследования статистики радиационного распада возбужденных образцов, а также описание процедур измерения времен поперечной релаксации и манипуляции одиночными спинами в NV центрах наноалмазов.

Центры окраски в алмазе являются перспективными твердотельными квантовыми системами, так как они обладают идентичностью в силу дальнего порядка строения конденсированного состояния вещества. Наличие спина в решетке алмаза и взаимодействующего с ним оптического перехода позволяет одновременно осуществлять операции со спином и передачу состояния с помощью излученных фотонов. На сегодняшний день, исследование центров окраски занимает существенную часть в области квантовых технологий, в частности квантовой сенсорики из-за ряда бесспорных преимуществ этих систем, в первую очередь, связанных с наличием компактной кристаллической структуры и возможностью манипуляций при комнатной температуре. В области квантовой сенсорики наноалмазы с центрами окраски также имеют уникальные перспективы применений ввиду химической инертности алмаза, малых размеров и возможности реализации полностью оптических сенсоров. В частности, на центрах окраски

азот-вакансия продемонстрированы сенсоры температуры с чувствительностью на уровне 1 мК/Гц^{0.5} и сенсоры магнитного поля с чувствительностью лучше, чем 1 пТ/Гц^{0.5}. В свою очередь, центры окраски кремний вакансия имеют узкую бесфононную линию в которой содержится порядка 70% излучения центра окраски. Уменьшение размеров наноалмазов, содержащих оптически активные центры окраски, является одной из важных задач и, например, определяет силу взаимодействия с метаповерхностями и резонансными структурами, а в случае использования наноалмазов в качестве сенсоров размер наноалмаза определяет разрешение. Диссертация имеет существенную практическую значимость в контексте ведущихся исследований в области квантовой коммуникации при создании высокоэффективных источников одиночных фотонов и создании памяти на базе спин-фотонных интерфейсов с центрами окраски в алмазе.

Данные результаты могут быть использованы целым рядом научно-технических организаций, которые занимаются разработками в области квантовых технологий: ГК Росатом, ОАО РЖД, ГК Ростех, МГУ, НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, ФИАН и другими.

Диссертация состоит из введения, трех оригинальных глав, заключения и списка литературы. В первую главу включен обзор литературы по двум типам центров окраски в алмазах (азот- и кремний-вакансии). Общий объем работы составляет 104 страницы, включая 37 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 97 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.

Глава 2 «Методика проведения экспериментов» посвящена описанию методик детектирования однофотонного излучения и экспериментальным методикам, которые использовались в диссертационной работе. Приводится описание самодельного конфокального микроскопа, измерение аппаратной функции установки и описание процедуры деконволюции.

В Главе 3 «NV центры в агрегатах детонационных алмазов» описан метод синтеза детонационных наноалмазов, особенности структуры и поверхности частиц. В экспериментальных работах в рамках главы продемонстрированы измерения функции автокорреляции второго порядка, времени жизни возбуждённого состояния и кривые насыщения светового потока от одиночных NV центров. Также проведены измерения когерентных свойств электронного спина одиночных NV центров в агрегатах детонационных наноалмазов.

Глава 4 «SiV центры в наноалмазах размеров около 10 нм» посвящена исследованию одиночных SiV центров в наноалмазах, полученных методом высоких давлений и высоких температур из органических компонент. В работе приводится детальное изучение свойств кристаллической структуры органических наноалмазов и измерение размеров исследуемых частиц. Приводятся измерения функции автокорреляции второго порядка, измерение времени жизни возбужденного состояния и кривые насыщения для светового потока. Измерена статистика положения и ширины бесфононной линии SiV центров.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

Результаты работы прошли широкую апробацию на международных конференциях и опубликованы в трех статьях в рецензируемых журналах, входящих в базу данных Web of Science.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

- Я не нашел во Введении определения бесфоновой линии излучения. Наверное, было бы уместно поместить его именно здесь – перед тем как описывать ее проявления в спектрах.
- Во второй Главе, на мой взгляд, некорректно использован термин «корреляционная функция первого и второго порядка» (формулы 4 и 5). Следовало бы упомянуть, что «первый/второй порядок» относится к интенсивности, а не к электромагнитному полю, тем более, что ниже говорится о глауберовских корреляционных функциях поля четвертого порядка (выражение 6).
- Там же вводится термин «термальный процесс»; общепринятым является «тепловой процесс».
- На стр. 38 говорится: «... в дальнейшем мы будем считать излучатель одиночным при соблюдении условия $g_2(0) < 0.5$ ». Это спорное утверждение, которое, на мой взгляд, не обосновано строго, тем более, что далее по значению $g_2(0)$ определять число квантовых излучателей (выражение 15).
- В Главе 3: непонятно на какой экспериментальной установке измерены графики 17 (а, б). Более того, на Рис.17 (б), судя по всему, приводятся нормированная корреляционная функция второго порядка по интенсивности. Однако по оси ординат отложены некие «Норм. отсчеты».
- Было бы полезно проанализировать экспериментально полученные в третьей Главе значения времен релаксации T_2 и T_2^* , например, привести соображения о том, $T_2=0.95$ – это много или мало, а также перечислить факторы, влияющие на эти значения.
- Это же замечание можно сделать и к результатам Главы 4 по определению характерных размеров L нанодiamondов.
- В работе имеется ряд досадных опечаток.

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 и лаконичность 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 С.В.Большедворского как экспериментатора, и о способности соискателя излагать собственные мысли.

- 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 Большедворского Степана Викторовича 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, Большедворский Степан Викторович, несомненно, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Доклад по материалам диссертации был сделан автором 15 ноября 2022 года на семинаре Центра квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова в очном формате. Отзыв на диссертацию одобрен на заседании семинара.

Отзыв на диссертацию составил:

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/

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ) по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. F. V. Gubarev, I. V. Dyakonov, M. Y. Saygin, G. I. Struchalin, S. S. Straupe, and S. P. Kulik, "Improved heralded schemes to generate entangled states from single photons," *Phys. Rev. A*, vol. 102, no. 1, pp. 1–8, 2020.
2. 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*, 2021, **103**, 1–12.
3. Y. V. Kartashov, A. A. Arkhipova, S. A. Zhuravitskii, N. N. Skryabin, I. V. Dyakonov, A. A. Kalinkin, S. P. Kulik, V. O. Kompanets, S. V. Chekalin, L. Torner and V. N. Zadkov, "Observation of Edge Solitons in Topological Trimer Arrays," *Phys. Rev. Lett.*, 2022, **128**, 93901.
4. G. I. Struchalin, Y. A. Zagorovskii, E. V. Kovlakov, S. S. Straupe, and S. P. Kulik, "Experimental Estimation of Quantum State Properties from Classical Shadows," *PRX Quantum*, vol. 2, no. 1, p. 1, 2021.
5. K. G. Katamadze, A. V. Pashchenko, A. V. Romanova, and S. P. Kulik, "Generation and Application of Broadband Biphoton Fields (Brief Review)," *JETP Lett.*, vol. 115, no. 10, pp. 581–595, 2022.

Информация о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д.1, Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова

Телефон: +7 (495) 939-10-00

Факс: +7 (495) 939-01-26

WWW: www.msu.ru E-mail: info@rector.msu.ru