

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Кандидатская диссертация Большедворского С.В. посвящена экспериментальному исследованию NV и SiV центров окраски алмазе. Разобраны процессы роста наноалмазов и исследованы оптические и когерентные свойства центров окраски.

В работе решались следующие взаимосвязанные задачи:

- Создание экспериментальной установки для исследований, включающей средства манипуляции состоянием спина центров окраски;
- Поиск наноалмазов с минимальным размером, содержащих оптически активные NV и SiV центры;
- Очистка алмазного материала для подготовки образцов, позволяющих наблюдать люминесценцию одиночных центров окраски;
- Разработка методов нанесения наноалмазов на подложки с заранее нанесенными метками для поиска и сопоставления карт люминесценции и топологических карт поверхности образца;
- Исследование люминесцентных и когерентных свойств одиночных NV центров в детонационных наноалмазах при комнатной температуре;
- Исследование люминесцентных свойств одиночных SiV центров в наноалмазах, полученных при синтезе из органических компонент методом ВДВТ.

Актуальность работы не вызывает сомнений в свете бурного развития квантовых оптических технологий. Наряду с базовыми научными направлениями, связанными с квантовыми коммуникациями, вычислениями и моделированием, особое значение приобретают экспериментальные работы, направленные на исследование перспективных квантовых систем, которые можно использовать в качестве носителей квантовой информации и квантовых сенсоров. Центры окраски в алмазе, безусловно, относятся к таким системам и являются предметом активных исследований.

Данная работы имеет **практическую значимость** для ученых в области квантовой оптики, а также работающих в смежных областях. В частности, в диссертации реализованы интересные экспериментальные методики по работе с наночастицами размером 1-10 нм, которые могут быть использованы в широком круге экспериментальных исследований и разработок.

Достоверность защищаемых положений и выводов подтверждается использованием различных методов исследований на современном оборудовании, согласованием результатов с теоретическими моделями, 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:

- При комнатной температуре измерен максимальный световой поток от одиночных NV центров окраски в агрегатах детонационных нанодIAMONDS и впервые проведено количественное сравнение с NV центрами в нанодIAMONDS, полученных дроблением синтетического алмаза.
- Впервые измерены время поперечной релаксации T_2^* и время когерентности T_2 электронного спина в одиночных NV центрах окраски в агрегатах детонационных нанодIAMONDS при комнатной температуре.
- Измерены распределения ширины и положения бесфононной линии спектра люминесценции SiV центров окраски в нанодIAMONDS размером около 10 нм при комнатной температуре.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 97 наименований, включает 37 рисунков и 2 таблицы. Объем диссертации составляет 104 страницы.

Во введении раскрывается актуальность выбранной темы, перечислены цели и задачи работы, а также научная новизна и практическая значимость, сформулированы защищаемые положения, личный вклад автора и сведения об апробации работы.

Первая глава является обзорной и включает подробную информацию об алмазе. Помимо свойств алмаза в главе кратко разбираются свойства следующих центров окраски: NV, SiV, NE8, Cr и GeV. Основную часть занимают свойства исследуемых в работе NV и SiV центров окраски. Описаны основные люминесцентные свойства и разобрана структура центров.

Вторая глава посвящена экспериментальным методикам, используемым автором в своей работе. Приводится описание самодельного конфокального микроскопа, процессов химической обработки алмазного материала, подготовки образцов для исследования и обработке данных.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию люминесцентных и когерентных свойств одиночных NV центров окраски в детонационных нанодIAMONDS. Оптически активные NV центры были обнаружены в агрегатах нанодIAMONDS, что подтверждено

корреляцией карт люминесценции образца и карт топологии, полученных с помощью атомно-силового микроскопа. Для одиночных центров было исследовано насыщение светового потока и проведено сравнение с наноалмазами, полученными дроблением кристаллических алмазов. Для электронного спина NV центра в основном состоянии проведены измерения времен когерентности и поперечной релаксации спина.

В четвертой главе диссертационной работы изучаются SiV центры окраски в наноалмазах, синтезированных методом высоких давлений и высоких температур из органических компонент размером около 10 нм. Подробно разобран процесс роста данных наноалмазов и проведено исследование свойств кристаллической структуры с помощью рентген-дифракционного анализа, комбинационного рассеяния, электронной микроскопии. При изучении люминесцентных свойств SiV центров приводятся результаты измерения функции автокорреляции второго порядка, времени жизни возбужденного состояния и спектров люминесценции центров окраски. Приводится статистика ширины и положения бесфононной линии спектра SiV центров и обсуждаются результаты измерений.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. В главе 1 автор делает следующее заключение «С точки зрения экспериментального применения в исследованиях интересен NV центр в NV^- зарядовом состоянии». Данное утверждение не совсем корректно, так как для различных задач могут быть интересны все зарядовые состояния NV центра (NV^+ , NV^0 или NV^-).
2. В пункте 3.2 проводится сравнение одиночных NV центров в детонационных наноалмазах и одиночных NV центров в наноалмазах, полученных дроблением. В качестве обоснования автор приводит гипотезу «...что излучение, собранное с наноалмазов оказывается больше, чем излучение с макроскопических монокристаллов алмаза» и ссылки на работы. Однако, в случае наночастиц могут проявляться эффекты связанные с резонансами Ми, о которых автор не упоминает.
3. При исследовании когерентных свойств электронного спина в пункте 3.3 было бы полезным получить информацию об измерении времени продольной релаксацией T_1 , которая отсутствует.

Кроме того, в тексте диссертации присутствуют опечатки (ошибки) и несогласованные предложения (неудачные обороты), в частности:

1. Стр. 43: пропущена ссылка на рисунок. В тексте стоит «см XXX».
2. Стр. 59: пропущена расшифровка формулы. Явно не сказано, что «P – мощность лазера».

3. Стр. 85: в подписи к рисунку 36 указывается разложение по сумме гауссовых функций, а в тексте описывается разложение по функциям Лоренца.
4. Стр. 85: в подписи к рисунку 37 словосочетание «гистограмма распределения...» путает читателя.

Тем не менее, эти замечания не носят принципиального характера и не снижают общую высокую оценку данной работы. В целом диссертационная работа оставляет хорошее впечатление. Особенно подчеркну тщательность описания деталей проведенных экспериментов и методик, используемых в работе. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе вполне обоснованы. Достоверность и новизна полученных результатов не вызывает сомнений. По теме диссертации опубликовано три работы в международных научных журналах, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных научных конференциях. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

На основании вышесказанного считаю, что содержание работы и форма ее представления полностью соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года., а её автор – Большедворский Степан Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

Калачев Алексей 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, раб. тел. (843)2319000.



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, тел. (843)2319000

Список публикаций

официального оппонента А.А. Калачева в рецензируемых научных изданиях по тематике диссертации С.В. Большедворского "Исследование центров окраски в наноалмазах и их агрегатах" за последние пять лет

- [1] A.A. Shukhin, J. Keloth, K. Hakuta, 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).
- [2]. N. Kukharchyk, D. Sholokhov, O. Morozov, S. L. Korableva, A. A. Kalachev, P. A. Bushev. Electromagnetically induced transparency in a mono-isotopic $^{167}\text{Er}:\text{}^7\text{LiYF}_4$ crystal below 1 Kelvin: microwave photonics approach // *Optics Express*, 28(20), 29166-29177 (2020)
- [3] X. Zhang, W.-T. Liao, A. Kalachev, R. Shakhmuratov, M. Scully, O. Kocharovskaya. Nuclear quantum memory and time sequencing of a single γ -photon // *Physical Review Letters*, 123(25), 250504(1-5) (2019)
- [4] 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)
- [5]. I.N. Chuprina, A.A. Kalachev. Generating frequency-bin qubits via spontaneous four-wave mixing in a photonic molecule // *Phys. Rev. A*, 100(4), 043843(1-7) (2019)
- [6] N. Kukharchyk, D. Sholokhov, O. Morozov, S.L. Korableva, A.A. Kalachev, P.A. Bushev. Optical coherence of $^{166}\text{Er}:\text{}^7\text{LiYF}_4$ crystal below 1 K // *New Journal of Physics*, 20, 023044(1-11) (2018)
- [7]. N. Kukharchyk, D. Sholokhov, O. Morozov, S. L. Korableva, J. H. Cole, A. A. Kalachev, P. A. Bushev. Optical vector network analysis of ultranarrow transitions in $^{166}\text{Er}^{3+}:\text{}^7\text{LiYF}_4$ crystal // *Optics Letters*, 43(4), 935-938 (2018)
- [8]. R. Akhmedzhanov. L. Gushchin, N. Nizov. V. Nizov, D. Sobgayda, I. Zelensky, A. Kalachev Electromagnetically induced transparency in an isotopically purified $\text{Nd}^{3+}:\text{YLiF}_4$ crystal // *Phys. Rev. B*, 97(24), 245123(1-5) (2018)
- [9]. I.N. Chuprina, S. Perrninov, D.Yu. Tarankova, A.A. Kalachev. Generating pure singlephoton states via spontaneous four-wave mixing in a system of coupled microresonators // *Laser Physics Letters*, 15(10), 105104(1-6) (2018)