

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Воробьева Вадима Владиславовича
«Исследование эффективных спин-фотонных интерфейсов на базе
центров окраски в алмазе», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.05 – Оптика

Диссертация Воробьева В. В. посвящена экспериментальным исследованиям единичных центров окраски в алмазе, разработке методов их детектирования и манипулирования фотофизическими характеристиками.

Выбранная тема диссертационного исследования, без сомнения, является актуальной, поскольку относится к бурно развивающемуся направлению нанофотоники. Повышенный интерес к изучению центров окраски в алмазе вызван их уникальными свойствами. Наиболее изученным к настоящему времени является центр окраски азот-вакансия (NV) в алмазе, обладающий богатыми оптическими и магнитными свойствами. Важно, что люминесценция одиночного центра окраски может быть зарегистрирована при комнатной температуре. Благодаря уникальным свойствам, данный центр окраски в алмазе часто рассматривается в качестве основы в ряде приложений квантовых технологий и наносенсорике.

Научная новизна диссертационной работы Воробьева В.В. определяется получением новой экспериментальной информации о люминесцентных характеристиках единичных NV центров в алмазе, разработкой методов манипуляции их фотофизическими свойствами путем размещения на поверхности метаматериалов, а также созданием нановолоконного интерфейса для эффективного сбора излучения от NV центра в наноалмазе. Таким образом, полученные в диссертации результаты представляют и серьезный практический интерес, поскольку большинство приложений требует возможности манипулирования характеристиками квантовых излучателей и упрощения техники их детектирования.

Научная значимость заключается в исследовании излучательных свойств одиночных излучателей вблизи гиперболического метаматериала. В эксперименте продемонстрировано существенное уменьшение времени затухания флюоресценции. Результат был получен впервые в мире.

Исследованы причины возникновения паразитного, фонового излучения в волоконном интерфейсе, мешающие созданию компактного,

интегрированного с волоконной техникой генератора однофотонного излучения, а также предложены способы борьбы с этим излучением.

Исследовано влияние различных параметров однофотонных сверхпроводящих детекторов нового поколения на качество измеряемых автокорреляционных функций второго порядка одиночных квантовых систем.

Обоснованность и достоверность защищаемых положений и выводов подтверждается использованием современного экспериментального оборудования, а также соответствием результатов моделирования и эксперимента.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав (одна из которых содержит обзорную информацию по теме диссертации), заключения, и списка литературы из 163 наименований. Общий объем диссертации 97 страниц, включая 46 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, приведены цели и задачи работы, указана ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы защищаемые положения, указан личный вклад автора и сведения об апробации.

Глава 1 представляет собой краткое изложение (обзор литературы) методики исследования однофотонного излучения, а также тематики, связанной с изучением центров окраски в алмазе. Приводится классификация алмазов по типу примесей, а также перечень и основные свойства основных центров окраски в алмазе.

Глава 2 посвящена описанию исследований излучательных свойств NV центра окраски в алмазе вблизи гиперболического метаматериала (ГММ). Собрана статистика однофотонных излучателей (NV центров окраски в наноалмазе), расположенных на ГММ с различной толщиной (толщина слоев 10 и 5 нм). Измерены времена жизни флюоресценции, кривые насыщения, а также произведено сравнение с аналогичной выборкой алмазов, размещенных на стеклянных подложках.

В Главе 3 описано исследование применимости нового типа сверхпроводящего детектора для регистрации однофотонного излучения NV центров окраски в алмазе. Проанализировано влияние отдельных параметров детектора на качество измеряемых квантовых свойств излучения.

Глава 4 посвящена исследованию адиабатически вытянутого волокна как оптического интерфейса для сбора излучения от одиночных NV центров в наноалмазах. Проведено исследование причин возникновения фонового

излучения, и предложены способы борьбы с паразитным фоновым излучением в таком интерфейсе.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

Результаты работы прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях и опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных WebofScience.

К числу наиболее интересных и важных новых результатов, полученных автором, следует отнести следующие:

1. В ходе проведенного эксперимента было выявлено, что время жизни возбужденного состояния NV центра в среднем уменьшается в 4 раза, а скорость счета одиночных фотонов в среднем увеличилась в 1.8 раза по сравнению с NV центрами в наноалмазе при их расположении на поверхности гиперболических метаматериалов.
2. Создана методика адиабатического вытягивания волокна, которая позволила получить пропускание волокна с перетяжкой до 95 % и методика создания оптического интерфейса за счет размещения отобранного заранее одиночного наноалмаза с NV центров на перетяжку вытянутого оптического волокна.
3. Проведено исследование сверхпроводящих детекторов, состоящих из меандра, выполненного из нитрита ниобия. Основным результатом исследования данных детекторов является возможность качественного измерения автокорреляционной функции второго порядка, несмотря на относительно низкую квантовую эффективность (0,2).

К тексту диссертационной работы имеется ряд замечаний:

1. На с. 6 приводится спорное, на мой взгляд, утверждение, что общий показатель эффективности сбора излучения в конфокальном микроскопе составляет ~ 1%. Для установок с высоко апертурными (особенно иммерсионными) объективами возможно достижение куда более высоких показателей (конечно, в зависимости от излучателя).
2. При обсуждении характеристик различных излучающих центров в алмазе в сводной таблице (с.17, таб1.1) указаны ширины бесфоновных линий (750 и 250 МГц). Не до конца представляется понятным, для какого случая приведены данные значения.

3. На с. 21 приводится утверждение, что бесфононная линия NV -центров при комнатной температуре уширена за счет перемешивания основного и возбужденного состояния фононами. Данное утверждение оказывается не до конца раскрытым. В диссертации не объяснена природа широкого фононного крыла в спектре (рис. 1.4).
4. На с. 22 приводится утверждение, что диаграмма излучения NV центров может быть представлена как излучение двух перпендикулярных диполей. Однако данное утверждение слабо подкреплено экспериментальными наблюдениями.
5. На с. 32 приводится утверждение, что NV центры являются немерцающим источником одиночных фотонов, что не в полной мере соответствует действительности. Так, например, в работе [Min Gu et al. "Super-resolving single nitrogen vacancy centers within single nanodiamonds using a localization microscope" // Optics Express, 21, 17639, 2013] авторы подробно обсуждают статистические закономерности в наблюдаемой в эксперименте мерцающей люминесценции одиночных NV-центров окраски в алмазе.
6. На с.39 приводятся результаты численного моделирования распределения интенсивности излучения диполя в присутствии гиперболического метаматериала. На рис. 2.3 приводится результат этих расчетов. При этом в подписи к рисунку нет пояснения, расшифровки, что, по всей видимости, на рис. б) рассматривается случай расположения диполя на поверхности, а не внутри ГММ.
7. При обсуждении разброса измеренных значений времени затухания люминесценции обсуждается разброс в зависимости от расстояния до ГММ. Стоит отметить, что для единичных центров в наноалмазах присутствует разброс сам по себе (видимо, играют роль и поверхностные дефекты). Было бы полезно сравнить эти эффекты.
8. На стр. 47 приводится весьма интригующая информация о том, что без использования PVA нанокристаллы исчезают из поля зрения микроскопа. При этом, на мой взгляд, не хватает детального анализа данной ситуации, причин и параметров исчезновения наноалмазов из поля зрения микроскопа.
9. На с.35, 50 и 67 приведены практически идентичные схемы, с небольшими вариациями. Такое дублирование представляется излишним.

10. На с. 52 при обсуждении кинетики люминесценции говорится о нескольких вкладах в кривую затухания, тогда как, фактически, рассматриваются только два вклада.
11. На с.60 рассматривается лавинный фотодиод без темновых шумов. Становится не ясно, о каком конкретно детекторе идет речь.

В тексте диссертации присутствуют опечатки (ошибки) и несогласованные предложения (неудачные обороты):

- с.4: «Несмотря на существований экспериментальных демонстраций»;
- с.25: «Использование одномерный и двумерных фотоннокристаллических резонаторов»
- с.27: «...исследования... были спровоцированы экспериментами»;
- с.27: «постоянная планка»;
- с.28: «Ханбури, Браун и Твисс»;
- с.29: «...истолкование ... подвергалось спорам»;
- с.54: пропущена запятая «предшествующая данной работе,»
- с.54: пропущена запятая «специально для задач, решаемых»;
- с.56: пропущена размерная единица « 0.1 с^{-1} »;
- с.59: опечатка «актуальность использования подобных дефектов возрастает», видимо, речь идет о «детекторах»
- с.68: пропущена точка «...сохраняется чистым.»
- с.73: по всей видимости, присутствует опечатка в «GeO центров окраски в алмазе», видимо, речь идет о «волокне»;
- с.80 опечатка «имерсионных»

Отмеченные замечания не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов и не снижают общую высокую оценку работы.

Обсуждая диссертационную работу Воробьева В.В. в целом, следует отметить ее высочайший научный и научно-технический уровень. Текст диссертации написан ясным языком, автореферат полностью отражает основные полученные результаты.

Диссертация В.В. Воробьева является законченной научно – квалификационной работой.

Диссертационная работа В. В. Воробьева удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013г., а ее автор, Воробьев Вадим Владиславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика»

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, доцент, профессор РАН, заместитель директора по научной работе

ФГБУН Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)


Андрей Витальевич Наумов

05.12.2017

108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5,
тел. 8(495) 851-05-79. E-mail:naumov@isan.troitsk.ru



Подпись А. В. Наумова заверяю,
учёный секретарь, руководитель научно-организационного отдела
ФГБУН Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)
кандидат физико-математических наук,


Евгений Борисович Перминов

108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5,
тел: 8(495)851-02-21e-mail:perminov@isan.troitsk.ru

Список публикаций официального оппонента д.ф.-м. н. А.В. Наумова по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях.

1. M. Knyazev, K. Karimullin, A. Naumov, "Revisiting the combined photon echo and single-molecule studies of low-temperature dynamics in a dye-doped polymer". *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*, **11** (3) (2017).
2. K.A. Magaryan, M.A. Mikhailov, K.R. Karimullin, M.V. Knyazev, I.Y. Eremchev, A.V. Naumov, I.A. Vasilieva, G.V. Klimusheva, "Spatially-resolved luminescence spectroscopy of CdSe quantum dots synthesized in ionic liquid crystal matrices". *Journal of Luminescence*, **169**, p. 799-803 (2016).
3. I.Y. Eremchev, I.S. Osad'ko, A.V. Naumov, "Auger Ionization and Tunneling Neutralization of Single CdSe/ZnS Nanocrystals Revealed by Excitation Intensity Variation". *Journal of Physical Chemistry C*, **120** (38), p. 22004-22011 (2016).
4. Y.G. Vainer, Y.I. Sobolev, A.V. Naumov, I.S. Osad'ko, L. Kador, "Fluorescence microscopy and spectroscopy of subsurface layer dynamics of polymers with nanometer resolution in the axial direction". *Faraday Discussions*, **184**, p. 237-249 (2015).
5. A.L. Shchukina, I.Y. Eremchev, A.V. Naumov, "Looking at a blinking quantum emitter through time slots: The effect of blind times". *Physical Review E*, **92** (3) (2015).
6. I.S. Osad'ko, I.Y. Eremchev, A.V. Naumov, "Two Mechanisms of Fluorescence Intermittency in Single Core/Shell Quantum Dot". *Journal of Physical Chemistry C*, **119** (39), p. 22646-22652 (2015).
7. T.A. Anikushina, M.G. Gladush, A.A. Gorshchev, A.V. Naumov, "Single-molecule spectromicroscopy: a route towards sub-wavelength refractometry". *Faraday Discussions*, **184**, p. 263-274 (2015).
8. Y.I. Sobolev, A.V. Naumov, Y.G. Vainer, L. Kador, "Low temperature spectral dynamics of single molecules in ultrathin polymer films". *Journal of Chemical Physics*, **140** (20) (2014).
9. A. Naumov, I.Y. Eremchev, A.A. Gorshchev, "Laser selective spectromicroscopy of myriad single molecules: tool for far-field multicolour materials nanodiagnostics". *European Physical Journal D*, **68** (11) (2014).
10. K.R. Karimullin, A.V. Naumov, "Dyes characterization for multi-color nanodiagnostics by phonon-less optical reconstruction single-molecule spectromicroscopy". *Journal of Luminescence*, **152**, p. 15-22 (2014).
11. T.A. Anikushina, A.V. Naumov, "Nonergodicity in long-term spectral dynamics of single dye molecules in the low-temperature polymer and organic glass". *Laser Physics*, **24** (9) (2014).
12. K. Karimullin, M. Knyazev, I. Eremchev, Y. Vainer, A. Naumov, "A tool for alignment of multiple laser beams in pump-probe experiments". *Measurement Science and Technology*, **24** (2) (2013).
13. I.Y. Eremchev, Y.G. Vainer, A.V. Naumov, L. Kador, "Observation of Structural Relaxations in Disordered Solid Media via Spectral Histories of Single Impurity Molecules". *Physics of the Solid State*, **55** (4), p. 710-719 (2013).
14. А.В. Наумов, "Спектроскопия органических молекул в твёрдых матрицах при низких температурах: от эффекта Шпольского к лазерной люминесцентной спектромикроскопии всех эффективно излучающих одиночных молекул". *Успехи Физических Наук*, **183** (6), p. 633-652 (2013).