

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Курочкина Никиты Сергеевича «Оптические свойства нанокристаллов в плазмонных наноантеннах и диэлектрических средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Физические процессы, происходящие в наноустройствах, играют принципиальную роль в целом ряде фундаментальных и прикладных задач оптики, лазерной физики, спектроскопии и кинетики люминесценции. Время нахождения в возбужденном состоянии квантовых систем, таких как полупроводниковые квантовые точки и центры окраски в алмазах, при спонтанном излучении составляет порядка 10 нс, что соответствует частотам около 100 МГц. Данные времена реализуются с достаточно низкой плотностью фотонных состояний в свободном пространстве, что является существенным ограничением для разрабатываемых электронных и фотонных устройств. Интенсивности излучения отдельных эмиттеров может быть недостаточно для стабильного обнаружения и использования их в практических задачах. Скорость и интенсивность спонтанного излучения отдельных молекул и полупроводниковых квантовых точек можно повысить за счет эффекта Парселла и эффектов взаимодействия эмиттера с резонатором.

**Актуальность диссертации.** В диссертации Н.С. Курочкина выполнено экспериментальное исследование и численный анализ ряда физических эффектов в наноструктурах с коллоидными квантовыми точками и плазмонными наноантеннами. Рассмотренные в работе процессы включают в себя перенос экситонного возбуждения между органическим комплексом и квантовыми точками, эффект Парселла, радиационные и нерadiационные процессы. Наряду с этим, в диссертации изучены ранее не исследованные резонансные процессы обмена энергии экситонов и плазмонов при их взаимодействии в наноантеннах. Тема диссертации Н.С. Курочкина несомненно актуальна и представляет интерес для широкого круга прикладных задач, включая разработку органических светодиодов и высокоскоростных источников одиночных фотонов, а также для решения ряда фундаментальных проблем микро и наноскопии.

**Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация включает в себя введение, четыре главы основного текста, заключение и список литературы и изложена на 133 страницах.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность исследования, описан личный вклад автора, обсуждена степень достоверности полученных результатов и изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит краткий обзор истории развития оптических антенн и текущего состояния исследований в данной области. Рассмотрены основные характеристики антенн и типы связи квантового эмиттера с резонатором. Также даны общие характеристики источников одиночных фотонов на базе коллоидных квантовых точек и центров окраски в алмазах. В заключении главы рассмотрены детекторы ближнего и среднего ИК диапазонов на основе коллоидных квантовых точек и плазмонных нанопатчей.

Во **второй главе** детально описаны проведенные в рамках работы оптические эксперименты, направленные на исследование оптического поглощения, спектральных и кинетических характеристик фотолюминесценции. Представлены сведения о технологии изготовления нанопатчей, структурной и морфологической характеристики металлических наночастиц и квантовых точек. Описана методика характеристики источников одиночных фотонов. Изложен метод конечных элементов и алгоритмы расчета характеристик наноструктур.

В **третьей главе** экспериментально продемонстрировано наличие процесса передачи электронного возбуждения от органического полупроводникового материала TPD к квантовым точкам CdSe/CdS/ZnS, а также между квантовыми точками в ансамбле. Измерено характерное время передачи возбуждения между соседними квантовыми точками. Также в главе были исследованы излучательные и корреляционные характеристики одиночных коллоидных квантовых точек и центров окраски в нанопатчах разных размеров. Квантовая статистика объектов была продемонстрирована на основе полученных автокорреляционных функций второго порядка.

**Четвертая глава** посвящена исследованию нанопатчей антенн кубической и треугольной геометрии с коллоидными квантовыми точками CdSe/CdS на алюминиевом основании. Продемонстрирован метод наблюдения нанопатчей антенны по отраженному излучению перестраиваемого лазера в системе конфокального микроскопа без использования темнопольного объектива.

Экспериментально измерены люминесцентные характеристики квантовых точек на стекле, металле и в нанопатч антенне на двух длинах волн лазерного возбуждения. Для нанопатч антенн кубической геометрии получено укорочение времени люминесценции квантовых точек с 12 нс до 0.2 нс, а также усиление интенсивности люминесценции до 330 раз.

По результатам, представленным в третьей и четвертой главах, сделаны промежуточные выводы. Основные, наиболее важные результаты и выводы диссертационной работы представлены в заключении.

Таким образом, диссертационная работа включает описание всех этапов исследований, обработки и объяснения полученных данных: в этом смысле её содержание является полным.

**Научная новизна** работы состоит в получении новых закономерностей спектральных и кинетических свойств нанопатч антенн.

Показано, что наноантенны обладают высокими значениями фактора Парселла и радиационной эффективности. Получено укорочение времен высвечивания люминесценции в нанопатч антеннах до 600 раз. Вычислены фактор Парселла, фактор усиления поля внутри нанопатч антенны и радиационная эффективность.

Для нанопатч антенны треугольной формы обнаружен красный сдвиг максимума плазмонного резонанса при увеличении длины ребра призмы, уменьшении высоты и уменьшении толщины зазора в нанопатч антенне. Вычислены спектры рассеяния плазмонной наночастицы треугольной формы в зависимости от ее окружения: в свободном пространстве, в водном растворе и в нанопатч антенне.

Предложен новый метод обнаружения плазмонных наноструктур в результате интерференции отраженного и рассеянного излучения перестраиваемого лазерного источника.

Впервые изготовлены и исследованы нанопатч антенны с алюминиевым основанием на основе серебряных наночастиц кубической формы и двухслойных коллоидных квантовых точек CdSe/CdS. Полученный фактор усиления интенсивности люминесценции достиг 300 раз, а укорочение времени спонтанной люминесценции - 60 раз.

**Научная значимость** результатов заключается в развитии представлений о процессе излучения наноструктур, а также динамики

релаксации возбужденного состояния эмиттеров в нанопатч антеннах. Выполнено сопоставление полученных экспериментальных результатов с расчетными. Получены закономерности смещения плазмонного резонанса нанопатч антенны в зависимости от ее геометрических размеров и диэлектрического окружения.

Полученные в работе результаты представляют значительный **практический интерес** с точки зрения разработки новых гибридных источников одиночных фотонов, органических светодиодов и детекторов инфракрасного диапазона.

Основные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертации не противоречат общим представлениям в рассматриваемой области науки. Использованные методики и подходы основываются на общеизвестных законах и представлениях и не вызывают сомнений. Достоверность обсуждаемых экспериментальных результатов обеспечивается применением высокоточного современного лабораторного оборудования, современных методов регистрации и обработки данных. Достоверность полученных результатов подтверждается апробацией основных результатов на конференциях, в опубликованных работах, 6 из которых изданы в рецензируемых изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus. Таким образом, обоснованность и достоверность результатов и выводов следует считать высокой.

#### **К недостаткам работы можно отнести следующее:**

1. На стр. 9 сказано: «Характерное время,  $\tau$  передачи возбуждения между квантовыми точками составляет 3 нс при характерном времени их люминесценции 18 нс.» Вопрос 1: при каком расстоянии между КТ реализуется данное время передачи электронного возбуждения? Вопрос 2: насколько правомочен термин «время люминесценции»?

2. На стр. 66 сказано: «В качестве характеристики для оценки эффективности передачи электронного возбуждения от TPD к нанокристаллам было использовано среднее время релаксации». Однако отсутствует анализ правомочности такого подхода.

3. Вывод №6 стр.118 следовало бы дополнить результатом от сделанного.

4. На стр.79 -80 представлены рисунки, которые демонстрируют изменение длины волны коэффициентов экстинкции и рассеяния. При этом

для коэффициента экстинкции указано, что: «Значение коэффициента экстинкции также увеличивается». А что происходит с коэффициентом рассеяния?

Данные недостатки имеют уточняющий и рекомендательный характер, и потому не снижают общую высокую оценку работы Н.С. Курочкина.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Диссертация Курочкина Никиты Сергеевича «Оптические свойства нанокристаллов в плазмонных наноантеннах и диэлектрических средах» полностью соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а также паспорту специальности 01.04.05 – «Оптика». Считаю, что Н.С. Курочкин заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика»

Официальный оппонент

Доктор физ.-мат. наук, профессор,  
заведующий лабораторией лазерной  
биоспектроскопии института общей  
физики им. А.М. Прохорова РАН



Лощёнов  
Виктор Борисович  
«04» декабря 2020 г.

тел. +7(499)135-14-89,  
e-mail: loschenov@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН»,  
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991

Подпись В.Б. Лощенова заверяю заместитель директора по  
научной работе, ВРИО ученого секретаря Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Федеральный  
исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М.  
Прохорова Российской академии наук»  
д.ф.-м.н., доцент

119991, Россия, г. Москва, ул.Вавилова, д.38, к.1  
Тел. 8(499)503-8705 e-mail: [glushkov@ph.fio.ru](mailto:glushkov@ph.fio.ru)



Глушков  
Владимир  
Витальевич

**Список основных публикаций оппонента  
доктора физико-математических наук В.Б. Лощенко  
по теме защищаемой диссертации за последние 5 лет**

1. D. Pominova, V. Proydakova, I. Romanishkin, A. Ryabova, S. Kuznetsov, P. Fedorov, **V. Loschenov**. Temperature sensing in the short-wave infrared spectral region using core-shell NaGdF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>@NaYF<sub>4</sub> nanothermometers. // *Nanomaterials* 2020, 10(10), 1992.
2. D.V.Pominova, V.Yu.Proydakova, I.D.Romanishkin, A.V.Ryabova, P.V.Grachev, V.I.Makarov, S.V.Kuznetsov, O.V.Uvarov, V.V.Voronov, A.D.Yapryntsev, V.K.Ivanov, **V.B.Loschenov**, Achieving high NIR-to-NIR conversion efficiency by optimization of Tm<sup>3+</sup> content in Na(Gd,Yb)F<sub>4</sub>: Tm upconversion luminophores, *Laser Phys. Lett.* 17 (2020) 125701.
3. Scalfi-Happ C., Zhu Z., Graefe S., Wiehe A., Ryabova A., **Loschenov V.**, Wittig R., Steiner R. Chlorin Nanoparticles for Tissue Diagnostics and Photodynamic Therapy // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. - 2018. - №22(0). - C.106-114.
4. Zhu Z., Scalfi-Happ C., Ryabova A., Gräfe S., Wiehe A., Peter R., **Loschenov V.**, Steiner R., Wittig R. Photodynamic activity of Temoporfin nanoparticles induces a shift to the M1-like phenotype in M2-polarized macrophages // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. - 2018. - №185(0). - C.215-222
5. Kholodtsova M., Daul C., **Loschenov V.**, Blondel W. Spatially and spectrally resolved particle swarm optimization for precise optical property estimation using diffuse-reflectance spectroscopy // *Optics Express*. - 2016. - №24(12). - C.12682-12700.
6. Pominova D., Ryabova A., Grachev P., Romanishkin I., Kuznetsov S., Rozhnova J., Yasyrkina D., Fedorov P., **Loschenov V.** Upconversion microparticles as time-resolved luminescent probes for multiphoton microscopy: Desired signal extraction from the streaking effect // *Journal of Biomedical Optics*. - 2016. - №21(9). - C.096002.
7. Pominova D., Ryabova A., Linkov K., Romanishkin I., Kuznetsov S., Rozhnova J., Konov V., **Loschenov V.** Pulsed periodic laser excitation of upconversion luminescence for deep biotissue visualization // *Laser Physics*. - 2016. - №26(8). - C.084001.
8. Orlovskii Y., Del B., Vanetsev A., Keeyend K., Kaldvee K., Samsonova E., Puust L., Jaque D., Ryabova A., Baranchikov A., Lange S., Sildos I., Kikas J., **Loschenov V.** NIR fluorescence quenching by OH acceptors in the Nd<sup>3+</sup> doped KY<sub>3</sub>F<sub>10</sub> nanoparticles synthesized by microwave-hydrothermal treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2016. - №661(0). - C.312-321.