



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44
E-mail: bauman@bmstu.ru
ОГРН 1027739051779
ИНН 7701002520 КПП 770101001

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по экономике и инновациям
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ имени Н.Э. Баумана),

Кандидат экономических наук, доцент
Сярожук Евгений Андреевич



« 4 » 12 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Курочкина Никиты Сергеевича

«Оптические свойства нанокристаллов в плазмонных наноплазмонных и диэлектрических средах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 -- оптика.

Актуальность темы диссертации. В настоящее время актуальными являются фундаментальные и прикладные задачи разработки и создания эффективных высокоскоростных источников света и одиночных квантовых излучателей. Одним из путей решения этой задачи является использование в качестве излучающих центров коллоидных квантовых точек, совмещенных с плазмонными наноплазмонными. Диссертация Курочкина Н.С. посвящена изучению оптических свойств коллоидных квантовых точек в системах с органической матрицей и плазмонными наноплазмонными, а также исследованию источников одиночных фотонов на базе квантовых точек и центров окраски в наноплазмонных.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет

133 страницы с 53 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 134 наименования.

Во **Введении** сформулирована цель, обоснована актуальность работы, проанализирована научная новизна исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, обоснована достоверность результатов.

В **первой главе** представлен обзор литературы по оптическим наноантеннам, источникам одиночных фотонов и детекторам ИК излучения на квантовых точках с плазмонными наночастицами. Рассмотрена история развития антенн от радиодиапазона к оптическому, приведены основные характеристики наноантенн. Изложены результаты работ, посвященных нанопатч антеннам как с металлическими наночастицами разной геометрии, так и с различными источниками излучения.

Во **второй главе** дано описание экспериментальных методик и установок, использованных в работе, также представлены технологические подходы к нанесению тонких пленок и изготовлению нанопатч антенн. Дана информация о приборах и методах, использованных для характеристики наночастиц. Описан метод коррелированного счета одиночных фотонов, применяемого для времяразрешенных экспериментов, а также методика Хэнбери Брауна-Твисса для исследования источников одиночных фотонов. Представлено описание метода конечных элементов, используемого в компьютерном моделировании, описаны алгоритмы расчета характеристик плазмонных наноантенн и скоростей затухания диполя квантовой точки в нанопатч антенне.

В **третьей главе** приведены экспериментальные результаты исследования коллоидных квантовых точек и центров окраски в алмазах в различном окружении. Представлены результаты исследования одиночных квантовых точек халькогенидов кадмия трех типов и центров окраски в НРНТ наноалмазах, получены провалы в корреляционных функциях второго порядка. Изучен механизм передачи электронного возбуждения между квантовыми точками трехслойного типа CdSe/CdS/ZnS и органическим комплексом TPD. Получена зависимость константы скорости переноса от расстояния между донором и акцептором, сделан вывод о ферстеровском механизме передачи возбуждения. Также исследован перенос энергии в слое квантовых точек, найдены характерные времена, соответствующие данному процессу.

В **четвертой главе** исследованы системы коллоидных квантовых точек с плазмонными наноантеннами. Приведены результаты исследования нанопатч антенн

треугольной и кубической геометрии с алюминиевым основанием. Для нанопатч антенн с треугольной серебряной нанопризмой установлены зависимости сдвига плазмонного резонанса нанопатч антенны от ее геометрических параметров. Измерены кинетические кривые затухания люминесценции квантовых точек в различном окружении: на стекле, на поверхности металла и в нанопатч антенне. Получено укорочение времени спонтанной люминесценции квантовых точек в нанопатч антенне треугольной геометрии до 600 раз, а кубической – до 60 раз. Для данных нанопатч антенн была построена теоретическая модель. Проведены расчеты распределения электромагнитного поля, сечений поглощения и рассеяния нанопатч антенн, радиационных эффективностей и факторов ускорения люминесценции эмиттеров в зазоре нанопатч антенн. Также в главе был продемонстрирован метод наблюдения серебряных наночастиц на стекле и на поверхности металла по отраженному лазерному излучению. Методика базировалась на использовании перестраиваемого лазера в сканирующем конфокальном микроскопе. В конце главы приведены результаты моделирования электромагнитного поля для детектора ближнего и среднего ИК диапазонов с коллоидными квантовыми точками PbSe, усиленного массивом металлических наночастиц.

В заключении приводятся основные выводы, отражающие результаты проведенных исследований.

Научная новизна исследования. Одна из наиболее важных особенностей исследуемых в работе процессов излучения и передачи электронного возбуждения заключается в том, что они происходят в области пространства много меньше длины волны. Решение поставленных в работе задач позволило диссертанту получить ряд новых научных результатов. Так, исследование процессов переноса энергии возбуждения между трехслойными коллоидными квантовыми точками CdSe/CdS/ZnS и органической матрицей TPD установило ферстеровский характер передачи энергии. Методом численного решения уравнений Максвелла установлены зависимости сдвига спектрального максимума плазмонного резонанса нанопатч антенны от ее геометрических параметров и характеристик. Исследование времен фотолюминесценции квантовых точек в нанопатч антенне с треугольной серебряной нанопризмой на алюминиевом основании показало укорочение времени люминесценции до 600 раз. Для нанопатч антенн с кубической наночастицей был получен фактор Парселла равный 60 и фактор усиления люминесценции до 330 раз. Был предложен новый метод идентификации плазмонных наночастиц и нанопатч антенн,

основанный на интерференции отраженного и рассеянного на исследуемой структуре излучения перестраиваемого лазера.

Обоснованность и достоверность основных результатов и выводов.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается грамотным использованием современного экспериментального оборудования и современных обоснованных методов исследования, корректной постановкой цели и задач диссертационной работы. Также достоверность результатов обеспечивается хорошим соответствием между экспериментальными данными и рассчитанными теоретически. Основные результаты диссертации изложены в печатных работах, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базе Web of Science и Scopus. Апробация диссертационной работы выполнена на международных и всероссийских научных конференциях.

Практическая значимость результатов диссертационной работы.

Практическая ценность и значимость работы определяется тем, что результаты по исследованию нанопатч антенн с коллоидными квантовыми точками могут служить основой для создания быстрых однофотонных источников излучения. Исследование механизмов переноса экситонного возбуждения между квантовыми точками и органическим комплексом имеют важное значение для создания светоизлучающих устройств – органических светодиодов на квантовых точках. Результаты расчетов структуры квантовых точек с массивом плазмонных нанопатч важны для разработки приемников излучения ближнего и среднего ИК диапазонов, работающих при комнатных температурах.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптических и квантовых приборов на основе квантовых точек в различных организациях и институтах: ФИАН им. Лебедева, МГТУ им Н.Э. Баумана, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, МГУ им М.В. Ломоносова и других.

Однако работа не лишена недостатков. Можно выделить следующие **замечания**:

1. В разделе 3.1.2 для коллоидных квантовых точек используется термин «полупроводниковые нанокристаллы», в то время как в других разделах сохраняется понятие «квантовые точки».
2. В главах 2 и 4 для ряда рисунков используются англоязычные подписи, например, рис. 2.1, рис. 4.10 и рис. 4.15.

3. Четвертое защищаемое положение необоснованно распространено на случай «диэлектрической проницаемости слоя в зазоре нанопатч антенны». В приведенных в тексте диссертации данных (раздел 4.1.2) менялось диэлектрическое окружение серебряной нанопризмы, варьирование диэлектрических параметров слоя в зазоре нанопатч антенны не производилось.
4. В разделе 4.2 кубические нанопатч антенны были экспериментально исследованы при возбуждении как на длине волны 375 нм, так и при помощи перестраиваемого источника излучения. В то же время нанопатч антенны треугольной формы, исследованные в разделе 4.1.3, возбуждались только одним лазером с длиной волны 375 нм. Автором не обоснована причина использования только одного лазера во втором случае.

5. В тексте диссертации присутствуют опечатки и неудачные формулировки. Несколько примеров:

Стр. 16, 4 строка. Пропущено слово «время».

Стр. 18. В подписи к формуле 1.5 присутствуют двойные тире.

Стр. 72, 2 абзац, 4 строка. Опечатка «для двух других наноалмазов».

Стр. 74. Во фразе «в нанопатч антенне имеется большое количество параметров, которые влияют на ее характеристики» непонятно о каких именно характеристиках идет речь.

Сделанные замечания не носят принципиальный характер, не снижают научной ценности представленной работы, не влияют на достоверность и значимость полученных результатов. Основные выводы работы полностью соответствуют её целям и положениям, выносимым на защиту. Указанные в диссертации публикации автора по теме исследования соответствуют содержанию диссертационной работы. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её основное содержание, научную новизну, выводы и положения, выносимые на защиту.

Тема, содержание и результаты диссертации Курочкина Н.С. отвечают паспорту специальности 01.04.05 – Оптика.

Основные материалы диссертации представлены в публикациях автора, общее количество которых составляет 12, из которых 7 опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и индексируемых базами Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа Курочкина Никиты Сергеевича «Оптические свойства нанокристаллов в плазмонных нанопатчах и диэлектрических средах» представляет

собой завершённую научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, в части, касающейся диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - Оптика.

Доклад Курочкина Н.С. по материалам диссертации был заслушан на семинаре кафедры ФН-4 «Физика» 18 ноября 2020 г. Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры ФН-4 «Физика» Бункиным Н.Ф.

Отзыв утвержден на заседании кафедры ФН-4 «Физика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

На заседании присутствовало 75 человек: из них 8 докторов наук, 54 кандидата наук. Результаты голосования: «за» – 75 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол № 3 от 18.11.2020 г.

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры ФН-4 «Физика»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5, стр. 1.
Телефон: +7(499) 263-63-68,
e-mail: nbunkin@bmstu.ru

Николай Федорович Бункин

Доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
ФН-4 «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5, стр. 1.
Телефон: +7(499) 263-63-68,
e-mail: amor@bmstu.ru

Андрей Николаевич Морозов

Список основных научных публикаций сотрудников ведущей организации МГТУ им. Н.Э. Баумана по теме диссертации Курочкина Никиты Сергеевича «Оптические свойства нанокристаллов в плазмонных наноплазмонных и диэлектрических средах», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Babenko, V.A., Bunkin, N.F., Sychev, A.A., Suyazov, N.V. Plasmon enhanced low frequency stimulated Raman scattering in water due to optical breakdown in gas nanobubbles (2020) *Journal of Optics (United Kingdom)*, 22 (1), p. 015401.
2. Lavrukhin, D.V., Yachmenev, A.E., Glinskiy, I.A., Zenchenko, N.V., Khabibullin, R.A., Goncharov, Y.G., Spektor, I.E., Zaytsev, K.I., Ponomarev, D.S. Emission Efficiency of Terahertz Antennas with Conventional Topology and Metal Metasurface: A Comparative Analysis (2020) *Optics and Spectroscopy*, 128 (7), pp. 1018-1025.
3. Babenko, V.A., Bunkin, N.F., Sychev, A.A. Effect of an Optical Breakdown on the Stimulated Raman Scattering in Water in the Field of Picosecond Laser Pulses (2019) *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 128 (5), pp. 664-671.
4. Dubinov, A.A., Aleshkin, V.Y., Morozov, S.V., Ryzhii, V., Otsuji, T. Terahertz plasmon-emitting graphene-channel transistor (2019) *Opto-electronics Review*, 27 (4), pp. 345-347.
5. Ryzhii, V., Otsuji, T., Ryzhii, M., Dubinov, A.A., Aleshkin, V.Ya., Karasik, V.E., Shur, M.S. Negative terahertz conductivity and amplification of surface plasmons in graphene-black phosphorus injection laser heterostructures (2019) *Physical Review B*, 100 (11).
6. Lobanova, E.M., Shabatina, T.I., Bochenkov, V.E. Computer Simulations of the Optical Properties of Triangular Gold Nanoparticle Dimers (2019) *Moscow University Chemistry Bulletin*, 74 (5), pp. 229-231.
7. Gorelik, V.S., Nechipurenko, S.O., Loboyko, A.A., Bunkin, N.F., Gudkov, S.V. Photoluminescence Spectroscopy of an Aqueous Solution of Uranyl Chloride upon Laser and LED Excitation (2018) *Physics of Wave Phenomena*, 26 (4), pp. 301-305.
8. Bunkin, N.F., Lyakhov, G.A., Shkirin, A.V., Krivokhizha, S.V., Afonin, A.A., Kobelev, A.V., Penkov, N.V., Fesenko, E.E., Jr. Laser Diagnostics of the Mesoscale Heterogeneity of Aqueous Solutions of Polar Organic Compounds (2018) *Physics of Wave Phenomena*, 26 (1), pp. 21-35.

9. Baburin, A.S., Kalmykov, A.S., Kirtaev, R.V., Negrov, D.V., Moskalev, D.O., Ryzhikov, I.A., Melentiev, P.N., Rodionov, I.A., Balykin, V.I. Toward a theoretically limited SPP propagation length above two hundred microns on an ultra-smooth silver surface [Invited] (2018) *Optical Materials Express*, 8 (11), pp. 3254-3261.
10. Bunkin, N.F., Lyakhov, G.A., Kozlov, V.A., Shkirin, A.V., Molchanov, I.I., Vu, M.T., Bereza, I.S., Bolikov, N.G., Fouilhe, V.L., Golyak, I.S., Golyak, I.S., Fufurin, I.L., Gorelik, V.S., Uspenskaya, E.V., Nguyen, H.S., Gudkov, S.V. Time dependence of the luminescence from a polymer membrane swollen in water: Concentration and isotopic effects (2017) *Physics of Wave Phenomena*, 25 (4), pp. 259-271.
11. Bunkin, N.F., Shkirin, A.V., Chirikov, S.N., Sendrovitz, A.L. Effect of the spatial distribution of probe beam on the results of measurements of the disperse composition of nanoparticles by dynamic light scattering method (2016) *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 43 (8), pp. 252-255.