

УТВЕРЖДАЮ

Ректор автономной некоммерческой
образовательной организации высшего
образования «Сколковский институт науки и
технологий»



А.П. Кулешов

2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Грициенко Александра Владимировича
«Фотодинамика люминесценции гибридных наноструктур с твердотельными источниками
света», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Диссертационная работа Грициенко Александра Владимировича «Фотодинамика люминесценции гибридных наноструктур с твердотельными источниками света» посвящена исследованию излучающих свойств наноразмерных твердотельных излучателей на основе люминесцентных полупроводниковых нанокристаллов, центров в наноалмазах и слоистом гексагональном нитриде бора, а также оптических наноантенн на основе металлических и диэлектрических частиц на поверхности металла и внутри металлических наноглублений.

Актуальность темы диссертации

Одним из ключевых компонентов, необходимых для создания систем защищенной оптической связи с использованием имеющихся на сегодняшний день алгоритмов, являются источники одиночных фотонов. Важнейшим показателем таких источников является испускание одиночных фотонов по запросу со скоростями не менее 10^6 c^{-1} для передачи информации на большие расстояния. Однако большинство разработанных источников, обладающих такими характеристиками, требуют охлаждения до криогенных температур, что существенным образом увеличивает себестоимость таких подходов, либо

могут работать при комнатных температурах, но с оптическими характеристиками, неподходящими для реального применения. В связи с этим поиск новых типов источников одиночных фотонов, работающих при комнатных температурах и обеспечивающих требуемые скорости испускания, а также разработка оптических элементов, позволяющих достигать необходимых скоростей излучения, безусловно является актуальным.

Структура и содержание диссертации

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 150 страниц с 59 рисунками и 4 таблицами. Список цитируемой литературы содержит 290 наименований.

Во **Введении** сформулирована цель, обоснована актуальность диссертационной работы, проанализирована научная новизна исследований, показана научная и практическая значимость полученных результатов. Представлены выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора.

В **первой главе** представлен обзор литературы по исследованиям в области твердотельных источников одиночных фотонов на основе молекулярных, полупроводниковых и диэлектрических систем, а также приведено описание основных характеристик твердотельных излучателей и их отличительные свойства для практического применения и рассмотрены математические модели, описывающие поведение системы, излучающей одиночные фотоны. Дополнительно в данной главе приведены основные способы увеличения эффективности вывода излучения, а также скорости спонтанного излучения источников одиночных фотонов с помощью применения оптических наноантенн на основе металлических и диэлектрических наночастиц.

Во **второй главе** дано описание экспериментальных методик и установок, используемых в диссертационной работе, для исследования наноразмерных излучателей с применением сканирующей конфокальной микроскопии, а также методики численного моделирования распределения электрического поля в наноантеннах на основе метода конечных элементов. Описаны методы экспериментального исследования характеристик излучения одиночных источников света с помощью коррелированного счета одиночных фотонов, спектров люминесценции и времен жизни возбужденных состояний.

Третья глава посвящена исследованию люминесцентных свойств коллоидных полупроводниковых нанокристаллов, одиночных NV- и SiV-центров в наноалмазах, а также люминесцирующих центров в наночастицах и многослойных пластинах гексагонального нитрида бора. В первой части главы приведены результаты экспериментальных измерений спектров, времен жизни, интенсивности излучения во времени для одиночных нанокристаллов CdSe/CdS и CdSe/CdS/ZnS, NV- и SiV-центров в наноалмазах и проанализированы отличительные свойства каждой излучающей системы. Во второй части главы приведены результаты исследования люминесцентных свойств наночастиц гексагонального нитрида бора с размерами менее 15 нм. Введена методика с использованием дополнительной оптической накачки, которая приводит к форсированному переходу излучающего центра в наночастице в состояние с высокой интенсивностью излучения. В третьей части главы представлены результаты исследования люминесцентных свойств источников одиночных фотонов, создаваемых в многослойных пластинах гексагонального нитрида бора.

В четвертой главе представлены методики увеличения эффективности наноразмерных излучателей с помощью металлических наноантенн различных конфигураций. В качестве основы для создания наноантенн были рассмотрены кубические, призмные и сферические наночастицы, помещенные на поверхность металлической пленки, а также внутри цилиндрических углублений в металле. Описываются экспериментальные результаты исследования люминесцентных свойств рутениевого комплекса $\text{Ru}(\text{bpy})_3(\text{PF}_6)_2$ в наноантеннах на основе пятиугольных наностержней и шестиугольных нанопризм на плоской поверхности алюминия. Приведены результаты численного моделирования излучения наноантенн на основе наночастиц, помещенных внутри наноглублений в металле. Описаны результаты экспериментального исследования наноантенн на основе серебряных нанокубиков и нанокристаллов CdSe/CdS внутри цилиндрических алюминиевых углублений. Также в главе приведено экспериментальное исследование люминесценции отрицательно заряженных центров кремний-вакансия в наноалмазах, помещенных внутри углублений в золоте, и описаны дополнительные механизмы, влияющие на люминесценцию наноалмазов внутри металлического углубления. В конце главы приведены результаты моделирования резонансных систем на основе сферических наночастиц из кремния на поверхности золотой пленки, а также в цилиндрических углублениях в золоте.

В заключении приводятся основные выводы, отражающие результаты проведенных исследований в диссертационной работе.

Научная новизна и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы

В работе впервые показано, что использование излучающих центров в слоях гексагонального нитрида бора позволяет создавать источники одиночных фотонов, работающие при комнатных температурах и позволяющие достичь скоростей испускания одиночных фотонов, требуемых для реализации систем защищенной оптической связи. Этот результат сопоставим, а в ряде параметров превосходит современные достижения, описанные в литературе. Предложен подход с дополнительным возбуждением, позволяющий вывести источник одиночных фотонов, находящийся в «темном» состоянии, в «светлое». Продемонстрирована возможность существенного увеличения фотолюминесценции центров окраски «кремний-вакансия» в наноалмазах внутри золотых цилиндрических углублений за счет оптически стимулированного изменения зарядового состояния этих центров. В работе впервые предлагается комбинация одиночной кремниевой наночастицы и наноразмерного углубления в золоте для повышения добротности образованного резонатора в несколько раз.

Результаты исследования позволят расширить имеющиеся знания о структуре и свойствах локализованных излучающих состояниях в гексагональном нитриде бора. Разработки новых конструкций наноантенн и источников одиночных фотонов, работающих при комнатных температурах, могут быть положены в основу практической реализации источников одиночных фотонов, выпускаемых в промышленных масштабах для установки в оборудовании связи. Полученные результаты представляют интерес при разработке оптических и квантовых приборов с применением излучающих слоистых материалов и полупроводников в различных организациях и институтах: ФИАН им. Лебедева, Сколтех, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ФТИ А. Ф. Иоффе, МГУ им. М. В. Ломоносова, ООО Сконтел, ОАО РЖД и других.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов

Обоснованность и достоверность экспериментальных результатов работы обеспечивались применением описанных в литературе проверенных методик и использованием современного экспериментального оборудования, корректной постановкой цели и задач диссертационной работы. Результаты моделирования получены с помощью стандартных вычислительных пакетов с использованием известных численных

алгоритмов. Основные результаты диссертации изложены в печатных работах, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Апробация диссертационной работы выполнена на международных и всероссийских научных конференциях.

Замечания по содержанию диссертационной работы

В тексте присутствует некоторое количество опечаток, стилистических погрешностей и пропуски слов. Отмеченное замечание не влияет на результаты работы и основные положения, а также общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Оценивая диссертационную работу Грициенко Александра Владимировича можно сделать следующее заключение:

1. Тема диссертации является актуальной, а полученные результаты могут быть применены исследователями в области квантовой передачи информации и криптографии для разработки источников неклассического излучения.

2. Представленные результаты диссертации обладают научной новизной, прошли апробацию на научных конференциях и опубликованы в рецензируемых печатных изданиях.

3. Тема, содержание и результаты диссертации отвечают паспорту специальности 1.3.6 – Оптика.

Диссертация Грициенко Александра Владимировича «Фотодинамика люминесценции гибридных наноструктур с твердотельными источниками света» 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, Грициенко Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика.

Доклад Грициенко А.В. по материалам диссертации был заслушан на Физическом семинаре Сколтеха 05 июня 2024 года. Отзыв составлен доктором физико-математических

наук профессором Сколковского института науки и технологий Николаем Алексеевичем Гиппиусом и доктором физико-математических наук доцентом Сколковского института науки и технологий Сергеем Александровичем Дьяковым.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании центра Инженерной физики автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» (Сколтех) 19 июня 2024 года.

Николай Алексеевич Гиппиус
доктор физико-математических наук, профессор,
директор группы Теоретической нанофотоники,
Центр инженерной физики
Сколковский институт науки и технологий
Телефон +7 910 405 33 78
E-mail n.gippius@skoltech.ru

Сергей Александрович Дьяков
доктор физико-математических наук, доцент,
группа Теоретической нанофотоники,
Центр инженерной физики
Сколковский институт науки и технологий
Телефон +7 926 567 44 23
E-mail s.dyakov@skoltech.ru

Владимир Прокопьевич Драчев
директор Центра инженерной физики
доктор физико-математических наук, профессор,
Сколковский институт науки и технологий

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий»,
121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, д. 30 стр.1

Телефон +7 (495) 280 14 81, e-mail inbox@skoltech.ru

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации «Сколковский институт науки и технологий» по теме диссертации Грициенко Александра Владимировича «Фотодинамика люминесценции гибридных наноструктур с твердотельными источниками света» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Fradkin I. M., Demenev A. A., Kovalchuk A. V., Kulakovskii V. D., Vladimir N. A., Dyakov S. A., Gippius N. A. Nearly Perfect Routing of Chiral Light by Plasmonic Grating on Slab Waveguide // *Advanced Optical Materials*. 2024.
2. Dyakov S. A., Salakhova N. S., Ignatov A. V., Fradkin I. M., Panov V. P., Song J., Gippius N. A. Chiral Light in Twisted Fabry–Pérot Cavities // *Advanced Optical Materials*. 2024. Vol. 12. No. 12.
3. Obydenov D. V., Shilkin D. A., Gulkin D. N., Lyubin E. V., Zhigunov D. M., Bessonov V. O., Fedyanin A. A. Asymmetric Silicon Dimers Made by Single-Shot Laser-Induced Transfer Demultiplex Light of Different Wavelengths // *Advanced Optical Materials*. 2024. Vol. 12. No. 10. p. 2302276.
4. Gromyko D. A., Dyakov S. A., Zinovyev V. A., Tikhodeev S. G., Gippius N. Resonant mode approximation of the scattering matrix of photonic crystal slabs near several Wood-Rayleigh anomalies // *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*. 2022. Vol. 50. p. 101015.
5. Smagina Z. V., Zinovyev V. A., Zinovieva A. F., Stepikhova M., Peretokin A. V., Rodyakina E. E., Dyakov S. A., Novikov A. V., Dvurechenskii A. V. Luminescent properties of spatially ordered Ge/Si quantum dots epitaxially grown on a pit-patterned “silicon-on-insulator” substrate // *Journal of Luminescence*. 2022. Vol. 249. p. 119033.
6. Dyakov S. A., Stepikhova M., Bogdanov A., Novikov A. V., Yurasov D. V., Shaleev M. V., Krasilnik Z. F., Tikhodeev S. G., Gippius N. A. Photonic Bound States in the Continuum in Si Structures with the Self-Assembled Ge Nanoislands // *Laser and Photonics Reviews*. 2021. Vol. 15. No. 7. p. 2000242.
7. Krichevsky D., Tolbin A. Yu., Dubinina T., Kosolobov S. S., Krasovskii V. I., Tomilova L. G., E. Pushkarev V., Zasedatelev A. Resonant Plasmon-Enhanced Absorption of Charge Transfer Complexes in a Metal–Organic Monolayer // *Advanced Optical Materials*. 2021. Vol. 9. No. 11. p. 2100065.

8. Agafilushkina S. N., Žukovskaja O., Dyakov S. A., Weber K., Sivakov V., Popp J., Cialla-May D., Osminkina L. A. Raman Signal Enhancement Tunable by Gold-Covered Porous Silicon Films with Different Morphology // *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 19. p. 5634.
9. Pavlov S. I., Dyakov S. A., Solomonov A. I., Nashchekin A. V., Feoktistov N., Gippius N., Tikhodeev S. G., Fradkin I. M., Pevtsov A. Fourier-Imaging Spectroscopy of Two-Dimensional Gold Nanodisk Array on Photoluminescent Layer // *Semiconductors*. 2020. Vol. 54. No. 14. pp. 1893-1896.
10. Arutyunyan N. R., Arutyunyan N. R., Rybkovskiy D. V., Rybkovskiy D. V., Obraztsova E. A., Obraztsova E. D., Obraztsova E. D. Size-induced evolution of optical properties in gallium selenide thin layers // *Journal of Luminescence*. 2022. Vol. 242. p. 118546.