

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1098-1103

УДК 538.958

Спектральные и кинетические свойства квантовых точек сульфида серебра во внешнем электрическом поле

Даниил Саузович Дайбаге¹✉, Сергей Александрович Амброзевич²,
Алексей Сергеевич Перепелица³, Иван Александрович Захарчук⁴,
Анна Владимировна Осадченко⁵, Дарья Михайловна Безверхняя⁶,
Антон Игоревич Авраменко⁷, Александр Сергеевич Селюков⁸

^{1,2,4,5,6} Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005,
Российская Федерация

^{1,5,8} Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация

^{1,2,6,8} Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация

³ Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Российская Федерация

⁷ Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва, 125190,
Российская Федерация

¹ daibagya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

² s.ambrozevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

³ a-perepelitsa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1264-0107>

⁴ zakharchukia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

⁵ osadchenkoav@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>

⁶ d.bezverkhnyaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1937-4689>

⁷ anton1905@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>

⁸ selyukov@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано влияние внешнего электрического поля на люминесцентные характеристики наночастиц сульфида серебра, внедренных в пленку на основе оптически пассивной диэлектрической матрицы.

Метод. Исследование люминесцентных характеристик выполнено методами оптической спектроскопии, а также времязадержанной спектроскопии с применением техники времякоррелированного счета одиночных фотонов. Морфология наночастиц изучена при помощи просвечивающей электронной микроскопии. **Основные**

результаты. Показано, что помещение наночастиц сульфида серебра во внешнее электрическое поле приводит к увеличению интенсивности полосы рекомбинационной люминесценции, а также к ускорению процессов релаксации электронного возбуждения. Этот эффект можно объяснить тем, что электрическое поле увеличивает скорость транспорта свободных дырок к электронным ловушкам, которые играют роль центров излучательной рекомбинации. **Практическая значимость.** Показано, что наночастицы сульфида серебра могут быть эффективно использованы в качестве активных слоев органических светоизлучающих диодов, где внешнее поле порядка 500 кВ/см не приведет к ухудшению их рабочих люминесцентных характеристик.

Ключевые слова

полупроводниковые наночастицы, сульфид серебра, рекомбинационная люминесценция, кинетика люминесценции, внешнее электрическое поле

Благодарности

Исследование проведено в рамках проекта РФФИ 20-02-00222 А.

Авторы выражают благодарность декану Физического факультета Воронежского государственного университета О.В. Овчинникову, а также доценту кафедры оптики и спектроскопии Воронежского государственного университета М.С. Смирнову за полезное обсуждение результатов.

Ссылка для цитирования: Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Перепелица А.С., Захарчук И.А., Осадченко А.В., Безверхняя Д.М., Авраменко А.И., Селюков А.С. Спектральные и кинетические свойства квантовых точек сульфида серебра во внешнем электрическом поле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1098–1103. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1098-1103

Spectral and kinetic properties of silver sulfide quantum dots in an external electric field

Daniil S. Daibagya^{1✉}, Sergey A. Ambrozevich², Aleksey S. Perepelitsa³,
Ivan A. Zakharchuk⁴, Anna V. Osadchenko⁵, Daria M. Bezverkhnyaya⁶,
Anton I. Avramenko⁷, Alexandr S. Selyukov⁸

^{1,2,4,5,6} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

^{1,5,8} Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation

^{1,2,6,8} Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation

³ Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation

⁷ Russian Institute for Scientific and Technical Information, Moscow, 125190, Russian Federation

¹ daibagya@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

² s.ambrozevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

³ a-perepelitsa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1264-0107>

⁴ zakharchukia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

⁵ osadchenkoav@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>

⁶ d.bezverkhnyaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1937-4689>

⁷ anton1905@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>

⁸ selyukov@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

Abstract

The effect of an external electric field on the luminescence characteristics of silver sulfide nanoparticles embedded in a film based on an optically passive dielectric matrix has been studied. The luminescence characteristics were studied using methods of optical and time-resolved spectroscopy involving the time-correlated single-photon counting technique. The morphology of the nanoparticles was studied using transmission electron microscopy. It was shown that in an external electric field, an increase in the intensity of the recombination luminescence band is observed for silver sulfide nanoparticles, together with an increase in the electronic relaxation rate. This effect is explained by the fact that the electric field enhances the transport of free holes to electron traps which are radiative recombination centers. The observed effects indicate that silver sulfide nanoparticles can be effectively used as active layers of organic light-emitting diodes, where an external field of the order of 500 kV/cm will not lead to a deterioration in their operating luminescence characteristics.

Keywords

semiconductor nanoparticles, silver sulfide, recombination luminescence, luminescence decays, external electric field

Acknowledgements

The study was carried out within the RFBR project no. 20-02-00222 A.

Authors are grateful to the Dean of the Faculty of Physics of Voronezh State University O.V. Ovchinnikov as well as to Associate Professor of the Department of Optics and Spectroscopy of Voronezh State University M.S. Smirnov for helpful discussions.

For citation: Daibagya D.S., Ambrozevich S.A., Perepelitsa A.S., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., Bezverkhnyaya D.M., Avramenko A.I., Selyukov A.S. Spectral and kinetic properties of silver sulfide quantum dots in an external electric field, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1098–1103 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1098-1103

Введение

В настоящее время перспективными источниками света являются органические светоизлучающие диоды [1–5]. Такие устройства экономичны, обладают низкой себестоимостью и могут быть нанесены на гибкие подложки. Больших успехов в создании органических светодиодов добились при использовании активных слоев на основе полупроводниковых нанокристаллов [6]. Такие люминесцентные материалы позволяют создать светоизлучающие устройства с высокой квантовой эффективностью и в меньшей степени подвержены деградации по сравнению с органическими люминофорами. Отметим, что имеющиеся на сегодняшний день успехи достигнуты для видимой области спектра. Применение полупроводниковых нанокристаллов для создания инфракрасных светодиодов исследовано существенно меньше, хотя такие работы оказываются актуальными и имеют множество применений, например в сфере машинного зрения [7]. Наиболее подходящими матери-

алами для использования в качестве люминесцентных слоев в органических светодиодах для инфракрасной области спектра являются наночастицы на основе узкозонных полупроводников, и, в частности, на основе коллоидных сферических квантовых точек сульфида серебра (Ag_2S) [8–11].

Создание органических светодиодов требует всестороннего изучения материала активного излучающего слоя. В этом случае важны не только люминесцентные свойства, но и их зависимость от внешнего электрического поля, возникающего в структуре светоизлучающего устройства [12, 13]. Для наночастиц Ag_2S исследования зависимости люминесцентных свойств от внешнего электрического поля являются единичными и не позволяют получить полную картину происходящих в наночастицах процессов.

В настоящей работе исследовано влияние внешнего электрического поля на люминесцентные характеристики наночастиц Ag_2S , полученных методом фотоиндуцированного синтеза в этиленгликоле.

Техника эксперимента

Синтез наночастиц Ag_2S был проведен с помощью техники фотоиндуцированного роста в этиленгликоле, обеспечивающей пассивацию их поверхности с помощью 2-меркаптопропионовой кислоты [14]. В качестве источника серебра использован нитрат серебра, а источника серы — 2-меркаптопропионовая кислота, взятая в молярном соотношении, в два раза превышающим количество нитрата серебра. Синтез проведен в стеклянной колбе, термостатированной при температуре 25 °C и при постоянном перемешивании магнитной мешалкой. В 30 мл этиленгликоля помещен 2,4 ммоль нитрата серебра, а затем добавлен 4,8 ммоль 2-меркаптопропионовой кислоты также в виде раствора в этиленгликоле. Рост наночастиц осуществлен в темном помещении в течение суток. Уменьшение дисперсии результирующих наночастиц по размерам реализовано с помощью фотолиза при облучении полученного раствора излучением лазера с длиной волны 405 нм и средней мощностью 100 мВт при постоянном перемешивании в течение суток. После проведения процедуры фотолиза наночастицы были выдержаны в темноте в течение трех суток для стабилизации.

Наночастицы были внедрены с помощью инфльтрации полученного раствора в оптически пассивную диэлектрическую органическую матрицу на основе полупроницаемой мембраны из регенерированной целлюлозы толщиной 5 мкм; характерные размеры пор мембраны составили порядка 3 нм.

Контроль размеров синтезированных наночастиц проведен с помощью просвечивающей электронной микроскопии с применением системы Carl Zeiss Libra 120.

Для определения влияния электрического поля на люминесцентные свойства наночастиц Ag_2S изготовлена серия образцов, состоящих из двух стеклянных подложек с нанесенными полупрозрачными электродами на основе оксида индия-олова, покрытыми пленкой полистирола толщиной 5 мкм. Между электродами помещен сэндвич из пленки тефлона толщиной 5 мкм, мембраны с внедренными наночастицами Ag_2S , и еще одной аналогичной пленки тефлона. В результате образцы имеют структуру, соответствующую плоскому конденсатору толщиной 25 мкм, имеющему полупрозрачные обкладки, в объем диэлектрика которого помещены исследуемые наночастицы. Напряжение смещения на полученные конденсаторы подано с высоковольтного источника постоянного напряжения Tesla TV-2, позволяющего задавать напряжение от 0 до 1500 В. При этом в объеме диэлектрика конденсатора было создано постоянное электрическое поле от 0 до 500 кВ/см с учетом диэлектрической проницаемости используемых материалов. Указанные значения поля являются характерными для органических светоизлучающих диодов.

Спектры люминесценции исследованных нанокристаллов измерены с помощью волоконного спектрометра Ocean Optics Maya 2000 Pro, чувствительного в диапазоне 200–1100 нм. Возбуждение было осуществлено с помощью лазера PicoQuant LDH-C-400, излучающего в области 405 нм со средней мощностью

5 мВт. Измерение кинетики люминесценции было проведено методом времякоррелированного счета одиночных фотонов с использованием коррелятора PicoQuant TimeHarp 100. При этом сигнал люминесценции регистрировали с помощью фотоэлектронного умножителя PicoQuant PMA-C 192-N-M, чувствительного в области 250–850 нм. Полоса детектирования шириной порядка 5 нм вырезана с помощью установленного перед фотоэлектронным умножителем монохроматора.

Результаты и их обсуждение

Изображение ансамбля наночастиц Ag_2S , полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа, представлено на рис. 1. Анализ изображения показал, что средний размер наночастиц составляет 2,7 нм, а дисперсия по размерам не превышает 20 %.

Спектры фотолюминесценции ансамбля наночастиц Ag_2S , помещенных в электрическое поле с различной напряженностью, представлены на рис. 2, а. В спектре наблюдается ярко выраженный максимум в области энергий 1,4 эВ, отвечающий рекомбинационной люминесценции [15–17], при этом ширина спектра на полувысоте составила около 320 мэВ. Помещение наночастиц в электрическое поле привело к скачкообразному увеличению интенсивности полосы люминесценции. Отметим, что с ростом поля интенсивность монотонно уменьшается, а форма спектров фотолюминесценции и положение ее максимума существенно не изменяются. Для наглядности на рис. 2, б представлена зависимость интеграла спектра рекомбинационной люминесценции по энергии для наночастиц сульфида серебра от напряженности электрического поля. Увеличение электрического поля от 100 до 500 кВ/см привело к практически линейному уменьшению интенсивности рекомбинационной полосы от 100 % до 92 %. Дальнейшее увеличение напряженности электрического поля не проводилось в силу электрического пробоя образца.

Кинетические зависимости интенсивности фотолюминесценции наночастиц Ag_2S при различных

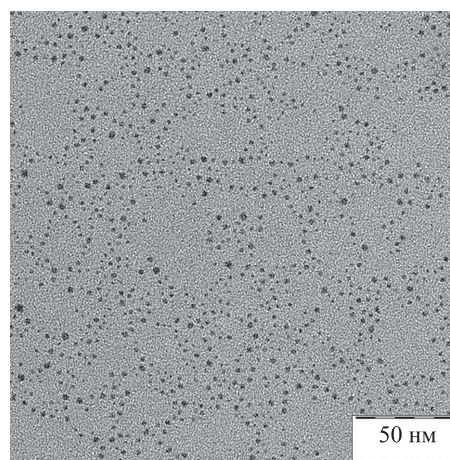


Рис. 1. Изображение наночастиц Ag_2S , полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Fig. 1. Transmission electron microscope image of Ag_2S nanoparticles

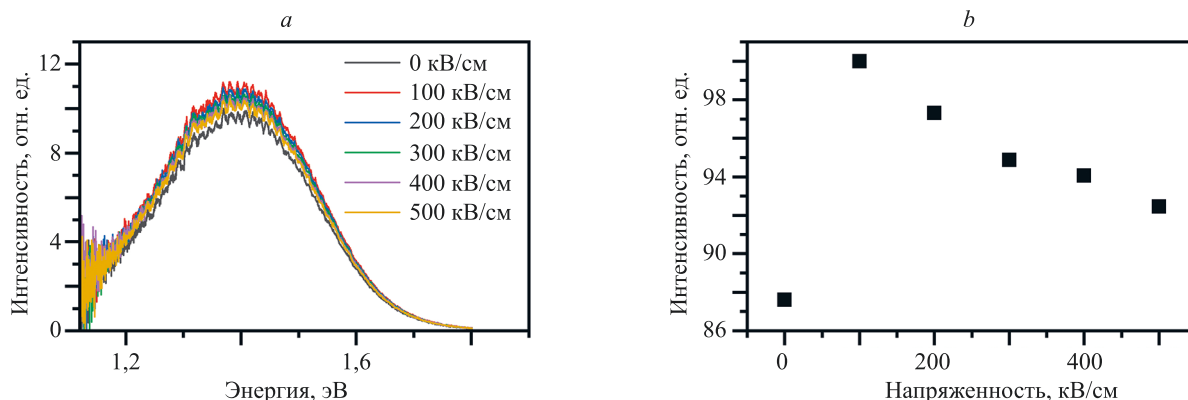


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции наночастиц Ag_2S во внешнем электрическом поле (a); зависимость интенсивности фотолюминесценции наночастиц Ag_2S от внешнего электрического поля (b)

Fig. 2. Photoluminescence spectra for Ag_2S nanoparticles in an external electric field (a); dependence of the photoluminescence intensity of Ag_2S nanoparticles vs. the external electric field (b)

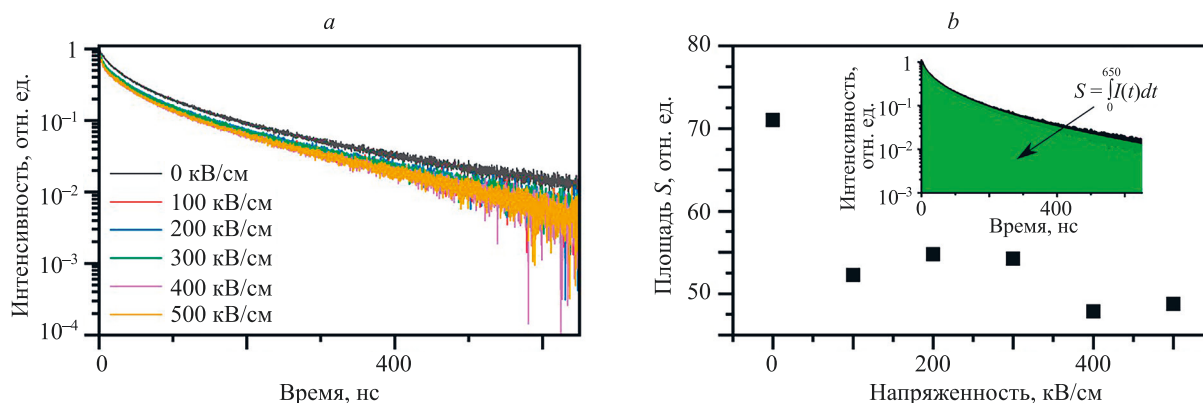


Рис. 3. Кинетические зависимости $I(t)$ фотолюминесценции наночастиц Ag_2S , измеренные при различных значениях внешнего электрического поля (a); зависимость интеграла S кинетических кривых $I(t)$ по времени t в пределах 0–650 нс от величины внешнего электрического поля (b).

На врезке черным цветом изображена зависимость $I(t)$, зеленым — геометрическая интерпретация интеграла S

Fig. 3. Photoluminescence decays $I(t)$ for Ag_2S nanoparticles measured at different values of the external electric field (a); dependence of integrated decays S within range 0–650 ns vs. the external electric field (b). The inset shows the $I(t)$ dependence (black); the green field shows the geometric interpretation of the integral S

величинах внешнего электрического поля представлены на рис. 3, a. Зависимости имеют существенно неэкспоненциальный вид. Видно, что при включении электрического поля происходит ускорение процессов релаксации электронного возбуждения. Для того чтобы установить качественное поведение кинетических зависимостей при изменении величины внешнего электрического поля, построены зависимости интеграла S от кинетических кривых люминесценции $I(t)$ наночастиц по времени t в пределах от 0 до 650 нс при различных значениях напряженности электрического поля (рис. 3, b). В области нулевого электрического поля величина интеграла максимальна; при полях от 100 до 500 кВ/см эта величина уменьшается и изменяется с ростом поля немонотонно.

Наблюдаемые экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Ускорение процессов релаксации электронного возбуждения и увеличение интенсивности люминесценции определяется тем, что электрическое поле увеличивает скорость транспор-

та свободных дырок к электронным ловушкам, играющим роль центров излучательной рекомбинации [18]. Снижение интегральной интенсивности фотолюминесценции с ростом поля может быть объяснено общей фотодеградацией интенсивности люминесценции наночастиц [19] в результате длительного комбинированного воздействия возбуждающего лазерного излучения и внешнего электрического поля.

Закключение

В работе экспериментально показано, что внешнее электрическое поле может изменять интенсивность люминесценции наночастиц сульфида серебра, а также влиять на скорость происходящих в них процессов релаксации электронного возбуждения. Тем не менее, полученные изменения люминесцентных свойств в полях от 100 до 500 кВ/см не являются существенными для того, чтобы утверждать, что наночастицы сульфида серебра не подходят для создания на их основе орга-

нических светоизлучающих диодов. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что наночастицы сульфида серебра могут быть использованы

для создания органических светоизлучающих диодов нового поколения.

Литература

1. Luo J., Rong X.-F., Ye Y.-Y., Li W.-Z., Wang X.-Q., Wang W. Research progress on triarylmethyl radical-based high-efficiency OLED // *Molecules*. 2022. V. 27. N 5. P. 1632. <https://doi.org/10.3390/molecules27051632>
2. Corrêa Santos D., Vieira Marques M.D.F. Blue light polymeric emitters for the development of OLED devices // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2022. V. 33. N 16. P. 12529–12565. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08333-3>
3. Ващенко А.А., Осадченко А.В., Селюков А.С., Амброзевич С.А., Захарчук И.А., Дайбаге Д.С., Шляхтун О., Володин Н.Ю., Чепцов Д.А., Долотов С.М., Травень В.Ф. Электролюминесценция кумариновых красителей // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2022. Т. 49. № 3. С. 13–18.
4. Ващенко А.А., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Селюков А.С., Васильев Р.Б., Соколик М.С. Органический светоизлучающий диод на основе плоского слоя полупроводниковых нанопластинок CdSe в качестве эмиттера // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2014. Т. 100. № 2. С. 94–98. <https://doi.org/10.7868/S0370274X14140045>
5. Селюков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Ващенко А.А., Васильев Р.Б., Соколик М.С. Электролюминесценция коллоидных квазидвумерных полупроводниковых наноструктур CdSe в гибридном светоизлучающем диоде // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2015. Т. 147. № 4. С. 687–701. <https://doi.org/10.7868/S0044451015040035>
6. Bauri J., Choudhary R.B., Mandal G. Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: a review // *Journal of Materials Science*. 2021. V. 56. N 34. P. 18837–18866. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06503-y>
7. Wu P., He T., Zhu H., Wang Y., Li Q., Wang, Z., Fu X., Wang F., Wang P., Shan C., Fan Z., Liao L., Zhou P., Hu W. Next-generation machine vision systems incorporating two-dimensional materials: Progress and perspectives // *InfoMat*. 2022. V. 4. N 1. P. e12275. <https://doi.org/10.1002/inf2.12275>
8. Jiang P., Tian Z.-Q., Zhu C.-N., Zhang Z.-L., Pang D.-W. Emission-tunable near-infrared Ag₂S quantum dots // *Chemistry of Materials*. 2012. V. 24. N 1. P. 3–5. <https://doi.org/10.1021/cm202543m>
9. Grevtseva I.G., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Perepelitsa A.S., Chevychelova T.A., Derepko V.N., Osadchenko A.V., Selyukov A.S. The structural and luminescence properties of plexcitonic structures based on Ag₂S/I-Cys quantum dots and Au nanorods // *RSC Advances*. 2022. V. 12. N 11. P. 6525–6532. <https://doi.org/10.1039/D1RA08806H>
10. Lin S., Feng Y., Wen X., Zhang P., Woo S., Shrestha S., Conibeer G., Huang S. Theoretical and experimental investigation of the electronic structure and quantum confinement of wet-chemistry synthesized Ag₂S nanocrystals // *The Journal of Physical Chemistry*. 2015. V. 119. N 1. P. 867–872. <https://doi.org/10.1021/jp511054g>
11. Grevtseva I., Ovchinnikov O., Smirnov M., Perepelitsa A., Chevychelova T., Derepko V., Osadchenko A., Selyukov A. IR luminescence of plexcitonic structures based on Ag₂S/I-Cys quantum dots and Au nanorods // *Optics Express*. 2022. V. 30. N 4. P. 4668–4679. <https://doi.org/10.1364/OE.447200>
12. Bozyigit D., Yarema O., Wood V. Origins of low quantum efficiencies in quantum dot LEDs // *Advanced Functional Materials*. 2013. V. 23. N 24. P. 3024–3029. <https://doi.org/10.1002/adfm.201203191>
13. Vitukhnovsky A.G., Selyukov A.S., Solovey V.R., Vasiliev R.B., Lazareva E.P. Photoluminescence of CdTe colloidal quantum wells in external electric field // *Journal of Luminescence*. 2017. V. 186. P. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.02.041>
14. Ovchinnikov O.V., Aslanov S.V., Smirnov M.S., Grevtseva I.G., Perepelitsa A.S. Photostimulated control of luminescence quantum yield for colloidal Ag₂S/2-MPA quantum dots // *RSC Advances*. 2019. V. 9. N 64. P. 37312–37320. <https://doi.org/10.1039/C9RA07047H>
15. Кацаба А.В., Федянин В.В., Амброзевич С.А., Витухновский А.Г., Лобанов А.Н., Селюков А.С., Васильев Р.Б., Саматов И.Г., Брунков П.Н. Характеризация дефектов в коллоидных нанокри-

References

1. Luo J., Rong X.-F., Ye Y.-Y., Li W.-Z., Wang X.-Q., Wang W. Research progress on triarylmethyl radical-based high-efficiency OLED. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 1632. <https://doi.org/10.3390/molecules27051632>
2. Corrêa Santos D., Vieira Marques M.D.F. Blue light polymeric emitters for the development of OLED devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, vol. 33, no. 16, pp. 12529–12565. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08333-3>
3. Vashchenko A.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Daibagya D.S., Shliakhtun O., Volodin N.Y., Cheptsov D.A., Dolotov S.M., Traven V.F. Electroluminescence of coumarin-based dyes. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 74–77. <https://doi.org/10.3103/S106833562203006X>
4. Vashchenko A.A., Vitukhnovskii A.G., Lebedev V.S., Selyukov A.S., Vasiliev R.B., Sokolikova M.S. Organic light emitting diode with an emitter based on a planar layer of cdse semiconductor nanoplatelets. *JETP Letters*, 2014, vol. 100, no. 2, pp. 86–90. <https://doi.org/10.1134/S0021364014140124>
5. Selyukov A.S., Vitukhnovskii A.G., Lebedev V.S., Vashchenko A.A., Vasiliev R.B., Sokolikova M.S. Electroluminescence of colloidal quasi-two-dimensional semiconducting CdSe nanostructures in a hybrid light-emitting diode. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2015, vol. 120, no. 4, pp. 595–606. <https://doi.org/10.1134/S1063776115040238>
6. Bauri J., Choudhary R.B., Mandal G. Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: a review. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, no. 34, pp. 18837–18866. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06503-y>
7. Wu P., He T., Zhu H., Wang Y., Li Q., Wang, Z., Fu X., Wang F., Wang P., Shan C., Fan Z., Liao L., Zhou P., Hu W. Next-generation machine vision systems incorporating two-dimensional materials: Progress and perspectives. *InfoMat*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. e12275. <https://doi.org/10.1002/inf2.12275>
8. Jiang P., Tian Z.-Q., Zhu C.-N., Zhang Z.-L., Pang D.-W. Emission-tunable near-infrared Ag₂S quantum dots. *Chemistry of Materials*, 2012, vol. 24, no. 1, pp. 3–5. <https://doi.org/10.1021/cm202543m>
9. Grevtseva I.G., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Perepelitsa A.S., Chevychelova T.A., Derepko V.N., Osadchenko A.V., Selyukov A.S. The structural and luminescence properties of plexcitonic structures based on Ag₂S/I-Cys quantum dots and Au nanorods. *RSC Advances*, 2022, vol. 12, no. 11, pp. 6525–6532. <https://doi.org/10.1039/D1RA08806H>
10. Lin S., Feng Y., Wen X., Zhang P., Woo S., Shrestha S., Conibeer G., Huang S. Theoretical and experimental investigation of the electronic structure and quantum confinement of wet-chemistry synthesized Ag₂S nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry*, 2015, vol. 119, no. 1, pp. 867–872. <https://doi.org/10.1021/jp511054g>
11. Grevtseva I., Ovchinnikov O., Smirnov M., Perepelitsa A., Chevychelova T., Derepko V., Osadchenko A., Selyukov A. IR luminescence of plexcitonic structures based on Ag₂S/I-Cys quantum dots and Au nanorods. *Optics Express*, 2022, vol. 30, no. 4, pp. 4668–4679. <https://doi.org/10.1364/OE.447200>
12. Bozyigit D., Yarema O., Wood V. Origins of low quantum efficiencies in quantum dot LEDs. *Advanced Functional Materials*, 2013, vol. 23, no. 24, pp. 3024–3029. <https://doi.org/10.1002/adfm.201203191>
13. Vitukhnovsky A.G., Selyukov A.S., Solovey V.R., Vasiliev R.B., Lazareva E.P. Photoluminescence of CdTe colloidal quantum wells in external electric field. *Journal of Luminescence*, 2017, vol. 186, pp. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.02.041>
14. Ovchinnikov O.V., Aslanov S.V., Smirnov M.S., Grevtseva I.G., Perepelitsa A.S. Photostimulated control of luminescence quantum yield for colloidal Ag₂S/2-MPA quantum dots. *RSC Advances*, 2019, vol. 9, no. 64, pp. 37312–37320. <https://doi.org/10.1039/C9RA07047H>
15. Katsaba A.V., Fedyanin V.V., Ambrozevich S.A., Vitukhnovsky A.G., Lobanov A.N., Selyukov A.S., Vasiliev R.B., Samatov I.G.,

- сталлах CdSe модифицированным методом термостимулированной люминесценции // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 10. С. 1339–1343.
16. Ovchinnikov O.V., Grevtseva I.G., Smirnov M.S., Kondratenko T.S. Reverse photodegradation of infrared luminescence of colloidal Ag₂S quantum dots // *Journal of Luminescence*. 2019. V. 207. P. 626–632. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.12.019>
 17. Derepko V.N., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Grevtseva I.G., Kondratenko T.S., Selyukov A.S., Turishchev S.Y. Plasmon-exciton nanostructures, based on CdS quantum dots with exciton and trap state luminescence // *Journal of Luminescence*. 2022. V. 248. P. 118874. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.118874>
 18. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag₂S quantum dots // *Journal of Luminescence*. 2020. V. 227. P. 117526. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117526>
 19. Смирнов М.С., Овчинников О.В., Гревцева И.Г., Звягин А.И., Перепелица А.С., Ганеев Р.А. Фотоиндуцированная деградация оптических свойств коллоидных квантовых точек Ag₂S и CdS, пассивированных тиогликолевой кислотой // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 124. № 5. С. 648–653. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.05.45946.312-17>
 - Brunkov P.N. Characterization of defects in colloidal cdse nanocrystals by the modified thermostimulated luminescence technique. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 10, pp. 1328–1332. <https://doi.org/10.1134/S1063782613100138>
 16. Ovchinnikov O.V., Grevtseva I.G., Smirnov M.S., Kondratenko T.S. Reverse photodegradation of infrared luminescence of colloidal Ag₂S quantum dots. *Journal of Luminescence*, 2019, vol. 207, pp. 626–632. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.12.019>
 17. Derepko V.N., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Grevtseva I.G., Kondratenko T.S., Selyukov A.S., Turishchev S.Y. Plasmon-exciton nanostructures, based on CdS quantum dots with exciton and trap state luminescence. *Journal of Luminescence*, 2022, vol. 248, pp. 118874. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.118874>
 18. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag₂S quantum dots. *Journal of Luminescence*, 2020, vol. 227, pp. 117526. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117526>
 19. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Grevtseva I.G., Zvyagin A.I., Perepelitsa A.S., Ganeev R.A. Photoinduced degradation of the optical properties of colloidal Ag₂S and CdS quantum dots passivated by thioglycolic acid. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124, no. 5, pp. 681–686. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18050211>

Авторы

Дайбаге Даниил Саузович — студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация; ассистент, Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57673090900](https://orcid.org/0000-0003-1944-1546), <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, daibagya@mail.ru

Амброзович Сергей Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; доцент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, s.ambrozevich@mail.ru

Перепелица Алексей Сергеевич — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Российская Федерация, [sc 55793662400](https://orcid.org/0000-0002-1264-0107), <https://orcid.org/0000-0002-1264-0107>, a-perepelitsa@yandex.ru

Захарчук Иван Александрович — студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukia@yandex.ru

Осадченко Анна Владимировна — студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация; ассистент, Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, osadchenkoav@student.bmstu.ru

Безверхняя Дарья Михайловна — студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация; лаборант, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1937-4689>, d.bezverkhnaya@mail.ru

Авраменко Антон Игоревич — научный редактор, Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва, 125190, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>, anton1905@internet.ru

Селюков Александр Сергеевич — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; старший преподаватель, Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, selyukov@lebedev.ru

Authors

Daniil S. Daibagya — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation; Assistant, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation; Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57673090900](https://orcid.org/0000-0003-1944-1546), <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, daibagya@mail.ru

Sergey A. Ambrozevich — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, s.ambrozevich@mail.ru

Aleksey S. Perepelitsa — PhD (Physics & Mathematics), Senior Lecturer, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation, [sc 55793662400](https://orcid.org/0000-0002-1264-0107), <https://orcid.org/0000-0002-1264-0107>, a-perepelitsa@yandex.ru

Ivan A. Zakharchuk — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukia@yandex.ru

Anna V. Osadchenko — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation; Assistant, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, osadchenkoav@student.bmstu.ru

Daria M. Bezverkhnaya — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation; Laboratory Assistant, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1937-4689>, d.bezverkhnaya@mail.ru

Anton I. Avramenko — Science Editor, Russian Institute for Scientific and Technical Information, Moscow, 125190, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>, anton1905@internet.ru

Alexandr S. Selyukov — PhD (Physics & Mathematics), Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Senior Lecturer, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, selyukov@lebedev.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2022
Одобрена после рецензирования 06.10.2022
Принята к печати 20.11.2022

Received 18.08.2022
Approved after reviewing 06.10.2022
Accepted 20.11.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»