



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 535.37

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12217>

Влияние плазмонных наночастиц Au на ИК люминесценцию ансамбля квантовых точек Ag₂S

И. Г. Гревцева[✉], О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, С. В. Асланов, А. Н. Латышев, М. С. Асташкина

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Экспериментально установлены люминесцентные проявления взаимодействия квантовых точек (КТ) Ag₂S с наностержнями (НСт) Au в зависимости от степени перекрытия соответствующих полос люминесценции и пиков плазмонного резонанса. В условиях спектрального резонанса показана возможность управления интенсивностью люминесценции КТ за счет изменения взаимодействия с НСт Au при вариации расстояния между компонентами плазмон-экситонной смеси, которое в свою очередь определяет влияние ближнего поля металлических наночастиц на фотопроцессы в КТ Ag₂S.

Расстройка спектрального резонанса за счет изменения длины НСт Au приводит к асимметрии спектрального контура полосы свечения КТ Ag₂S, которая может быть обусловлена проявлением эффекта Фано при плазмон-экситонном взаимодействии с учетом неоднородного уширения соответствующих полос.

Ключевые слова: квантовая точка, плазмонные наночастицы, плазмонный резонанс, ИК люминесценция, плазмон-экситонное взаимодействие

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-3746.2022.1.2.

Благодарности: Результаты просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе Libra 120 были получены на оборудовании Центра Коллективного Пользования ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет».

Для цитирования: Гревцева И. Г., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Асланов С. В., Латышев А. Н., Асташкина М. С. Влияние плазмонных наночастиц Au на ИК люминесценцию ансамбля квантовых точек Ag₂S. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 424–430. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12217>

For citation: Grevtseva I. G., Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Aslanov S. V., Latyshev A. N., Astashkina M. S. Effect of plasmonic Au nanoparticles on IR luminescence of Ag₂S quantum dots. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(3): 424–430. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12217>

✉ Гревцева Ирина Геннадьевна, e-mail: grevtseva_ig@inbox.ru

© Гревцева И. Г., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Асланов С. В., Латышев А. Н., Асташкина М. С., 2024



1. Введение

Полупроводниковые коллоидные квантовые точки (КТ) представляют собой актуальные объекты исследования в силу их размерно-зависимых спектрально-люминесцентных свойств, обеспечивающих управление максимумами соответствующих спектров за счет вариации размером без изменения химического состава нанокристаллов [1–9]. Столь уникальные спектральные свойства коллоидных КТ делают их перспективными материалами для широкого круга практических приложений современной фотоники, в том числе оптоэлектроники [1, 2, 7–9], люминесцентной и биосенсорики [2, 5, 6], фотокатализа [1–4] и др.

Дополнительные возможности для управления спектрально-люминесцентными свойствами КТ дает использование эффектов экситон-экситонного и плазмон-экситонного взаимодействия [10–21]. Плазмон-экситонное взаимодействие, реализующееся при ассоциации коллоидных КТ с плазмонными наночастицами, приводит к ярким эффектам [12–21]. Физический механизм плазмон-экситонных эффектов связан с взаимным ближнепольным взаимодействием КТ и НЧ, при котором НЧ выполняет роль как источника сильной поляризации окружения, так и нанорезонатора, концентрирующего энергию поля [13, 14, 17]. Значительный ряд экспериментальных исследований, реализованных преимущественно в рамках методик спектроскопии одиночных объектов, демонстрирует рост интенсивности люминесценции КТ с одновременным уменьшением ее длительности в присутствии плазмонных НЧ, что интерпретируется как проявление эффекта Парселла [12, 13, 18–21]. В зависимости от величины взаимного расстояния компонентов плазмон-экситонной структуры и спектральной настройки резонансов в спектрах люминесценции и экстинкции плазмонных НЧ вероятно наблюдение эффекта квантовой интерференции (эффекта Фано), а также расщепления спектров люминесценции в условиях сильной плазмон-экситонной связи (расщепление Раби) [13, 15–17]. Развитие приложений, связанных с использованием плазмон-экситонных эффектов в люминесцентной сенсорике, требует понимания возникающих между НЧ и КТ взаимодействий, а также их проявления в люминесценции ансамблей КТ [18, 19, 22–24]. Дисперсия КТ по размерам в ансамбле предполагает заметное уширение их полосы люминесценции, а также отстройку от спектрального ре-

зонанса, что определяет эффекты взаимодействия в результирующих спектральных свойствах плазмон-экситонных наноструктур [18, 19, 22–24]. Кроме того, необходимые условия для наблюдения эффектов плазмон-экситонного взаимодействия (спектральный резонанс пика экстинкции НЧ и полосы люминесценции КТ, расстояние между компонентами) предполагают наличие других, сопутствующих процессов взаимодействия, в частности, безызлучательный перенос энергии между КТ и НЧ [25], а также фотоиндуцированный перенос заряда [26, 27]. В связи с этим проявление эффектов плазмон-экситонного взаимодействия в люминесцентных свойствах ансамблей коллоидных КТ может значительно отличаться от проявления этих эффектов для одиночного излучателя.

Данная работа посвящена экспериментальному установлению влияния плазмонных наностержней (НСт) Au на ловушечную ИК люминесценцию ансамблей КТ Ag_2S в зависимости от степени перекрытия пика плазмонного резонанса и полосы люминесценции.

2. Методики и объекты исследования

Синтез коллоидных КТ Ag_2S осуществляли в этиленгликоле. В качестве пассивирующего лиганда использовали молекулы 2-меркаптопропионовой кислоты (2-МРА) [28]. Методика синтеза предполагала смешивание прекурсоров AgNO_3 и 2-МРА в молярном соотношении 1:2 в 30 мл этиленгликоля. Управление размером частиц и положением максимума люминесценции в рамках данного подхода достигали путем экспонирования коллоидного раствора КТ Ag_2S излучением с длиной волны 405 нм (100 мВт) в течение 20 часов. Для удаления побочных продуктов реакции коллоидные КТ Ag_2S осаждали при помощи центрифугирования и повторного растворения в этиленгликоле.

Плазмонные НСт Au были получены в рамках водного синтеза с использованием молекул цетилтриметиламмония бромида (ЦТАБ), которые образуют цилиндрические мицеллы, тем самым определяя анизотропные условия для роста НСт [18]. В рамках данного подхода к синтезу управление длиной НСт Au достигали путем добавления в реакционный раствор AgNO_3 . Изменение длины НСт Au позволяет управлять положением пика экстинкции продольного плазмонного резонанса НСт Au, обеспечивая при этом спектральный резонанс с полосой люминесценции КТ Ag_2S .

Формирование плазмон-экситонных смесей осуществляли путем внесения в коллоидный раствор КТ Ag_2S раствор НСт Au в концентрационном соотношении $\sim 10^4:1$ шт. соответственно. При исследовании спектрально-люминесцентных свойств смесей КТ Ag_2S и НСт Au в качестве образцов сравнения служили растворы, содержащие отдельно КТ Ag_2S и НСт Au в концентрациях, эквивалентных вводимым при формировании их смесей.

Структурные данные КТ Ag_2S и НСт Au устанавливали с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Libra 120 (CarlZeiss, Germany) и ПЭМ высокого разрешения JEOL 2000FX (JEOL Ltd., Japan). Исследование абсорбционных свойств осуществляли с использованием спектрометра USB2000+ (OceanOptics, USA) с источником излучения USB-DT (OceanOptics, USA). Спектры люминесценции и кинетику затухания люминесценции КТ Ag_2S исследовали с помощью USB2000+ и платы время-коррелированного однофотонного счёта TimeHarp 260 (PicoQuant Germany) с модулем ФЭУ PMC-100-20 (Becker & Hickl Germany) с временным разрешением, составляющим 0.2 нс. Для возбуждения люминесценции использовали лазерный диод LD PLTB450 (Osram, Germany) с излучением на длине волны 445 нм (200 мВт).

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Структурные свойства

Анализ ПЭМ изображений КТ Ag_2S показал формирование отдельных нанокристаллов со средним размером 2.8 ± 0.5 нм с дисперсией в ансамбле $\sim 30\%$, что обусловлено избранным подходом коллоидного синтеза в водном растворе (рис. 1а).

По данным ПЭМ изображений установлено формирование НСт Au со средними значениями длины 30 ± 5 нм, 35 ± 5 нм и диаметра 9 ± 2 нм (рис. 1б), а также НСт Au со средним значением длины 45 ± 5 нм и диаметра 9 ± 2 нм (рис. 1в). Дисперсия НСт Au в ансамбле не превышала 30% (рис. 1б, в).

Данные ПЭМ высокого разрешения (рис. 1г) показали скопление сферических наночастиц вблизи цилиндрических наночастиц. При этом межплоскостное расстояние ~ 0.251 нм сферических наночастиц соответствует кристаллографической плоскости (022) моноклинной кристаллической решетки Ag_2S , а межплоскостное расстояние 0.237 нм цилиндрических наночастиц соответствует кристаллографической плоскости (111) кубической границентрированной кристаллической решетки Au (рис. 2г).

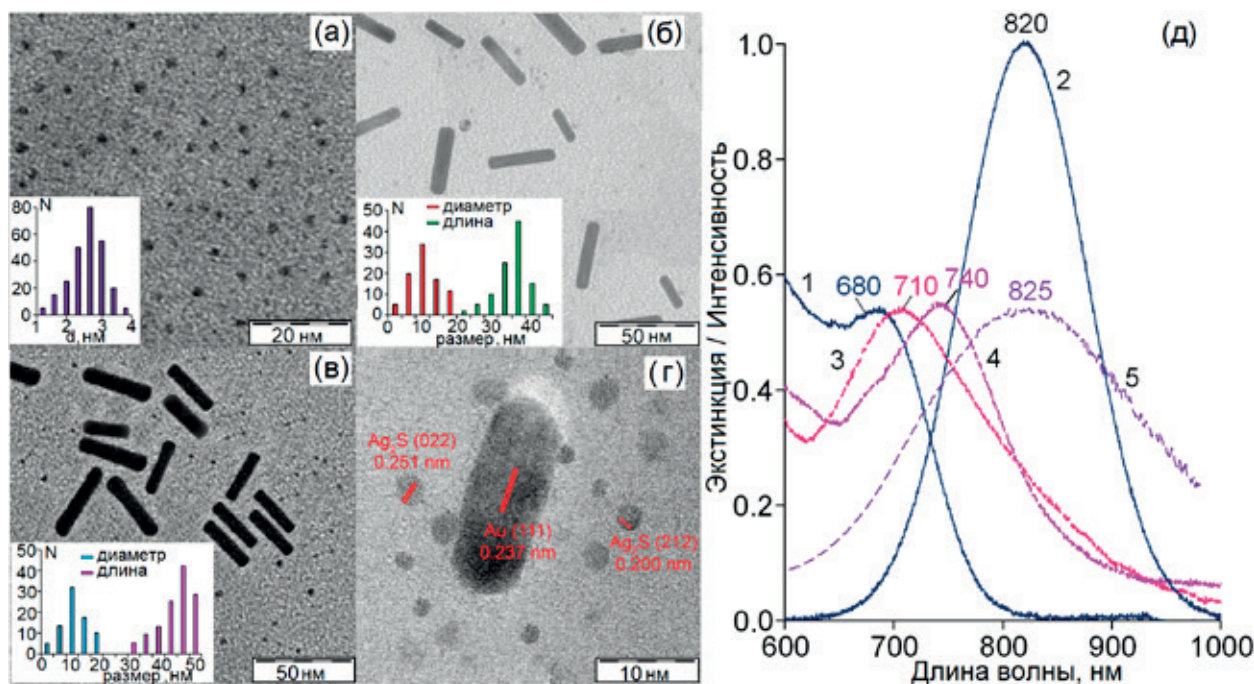


Рис. 1. ПЭМ изображение КТ Ag_2S – (а); ПЭМ изображение НСт Au средней длиной 30 нм и 35 нм – (б); ПЭМ изображение НСт Au средней длиной 45 нм – (в); ПЭМ изображение высокого разрешения смесей КТ Ag_2S и НСт Au – (г); спектр оптического поглощения (1) и люминесценции (2) КТ Ag_2S , спектры экстинкции НСт Au со средними значениями длины 30 нм (3), 35 нм (4) и 45 нм (5) – (д)

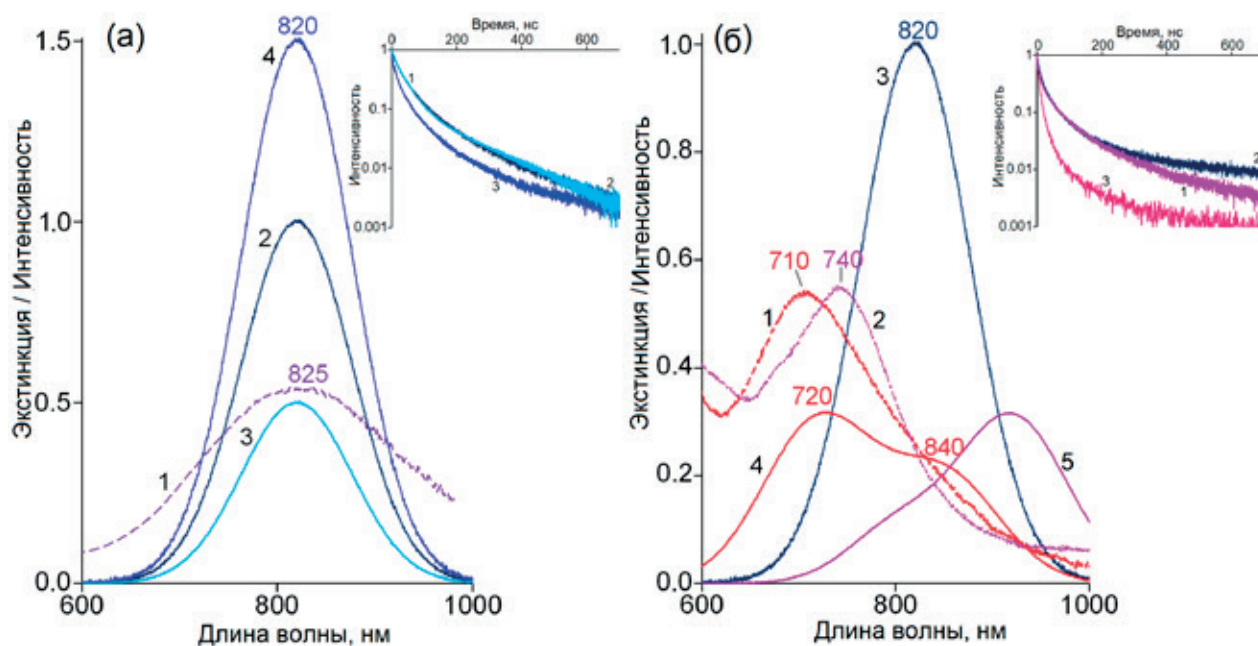


Рис. 2. Спектр экстинкции НСт Au средней длиной 45 нм (1), спектры люминесценции свободных КТ Ag_2S (2), в присутствии плазмонных НСт Au (3) и в присутствии плазмонных НСт Au и полимера (4) – (а). Спектр экстинкции НСт Au средней длиной 30 нм (1) и 35 нм (2), спектры люминесценции свободных КТ Ag_2S (3), в присутствии плазмонных НСт Au средней длиной 30 нм (4) и в присутствии плазмонных НСт Au средней длиной 35 нм (5) – (б)

3.2. Спектрально-люминесцентные свойства

В спектре оптического поглощения КТ Ag_2S в области 680 нм наблюдается ярко-выраженная особенность, которая соответствует основному экситонному переходу в оптическом поглощении КТ, характерного для носителей заряда, испытывающих конфинмент в нанокристаллах (рис. 1д, кривая 1). Спектр оптического поглощения соответствует КТ Ag_2S со средним размером 2.7 нм [28], что хорошо согласуется с данными ПЭМ изображений (рис. 1а). Для исследуемых коллоидных КТ Ag_2S характерна люминесценция с максимумом полосы при 820 нм (рис. 1д, кривая 2). Стоксов сдвиг составляет 0.31 эВ (140 нм). Согласно данным работы [29], люминесценция КТ Ag_2S есть результат излучательной рекомбинации дырок с локализованными на уровнях структурно-примесных дефектов электронами.

Морфология и среднее значение длины НСт Au 30, 35 и 45 нм обеспечивают расположение пиков продольного плазмонного резонанса при 710, 740 и 825 нм соответственно (рис. 1д, кривые 3, 4, 5). Таким образом, НСт Au средней длиной 30 и 35 нм обеспечивают отстройку спектрального резонанса продольного плазмонного пика НСт Au от полосы люминесценции КТ Ag_2S

на 110 и 80 нм соответственно (рис. 1д, кривые 2, 3, 4). В свою очередь, НСт Au длиной 45 нм обеспечивают значительный спектральный резонанс пика продольной моды НСт Au со спектром люминесценции КТ Ag_2S (рис. 1д, кривые 2, 5).

Формирование плазмон-экситонных структур на основе КТ Ag_2S и НСт Au, обеспечивающих значительное спектральное перекрытие пика продольного плазмонного резонанса НСт и полосы люминесценции КТ, приводит к снижению интенсивности свечения КТ Ag_2S в 2.5 раза (рис. 2а, кривые 1–3) при неизменном времени затухания люминесценции КТ Ag_2S (рис. 2а, врезка, кривые 1, 2). Обнаруженные закономерности обычно интерпретируются как фотоиндуцированный перенос заряда от КТ Ag_2S к НСт Au [18, 26, 27]. Вместе с тем авторами работы [30] в рамках простой классической модели вынужденных и спонтанных дипольных переходов в двухуровневой системе вблизи металлической НЧ показано, что снижение интенсивности свечения излучателя с сохранением его времени жизни вблизи поверхности металлической НЧ может быть обусловлено высоким поглощением энергии волны НЧ. При этом увеличение расстояния между компонентами плазмон-экситонной смеси в одних случаях приводит к усилению, а в других

– к снижению интенсивности свечения излучателя, что определяется взаимной ориентацией дипольного момента перехода излучателя из основного в возбужденное состояние и поля металлической НЧ, которая сильно зависит от расстояния между компонентами смеси [30]. Пространственное разделение компонентов смеси за счет внесения полимера в плазмон-экситонную смесь обеспечивает увеличение квантового выхода свечения КТ Ag_2S от 5 до 7.5 % (рис. 2а, кривые 2, 4). Незначительный рост квантового выхода люминесценции может быть обусловлен значительным вкладом в результирующие люминесцентные свойства плазмон-экситонных смесей неизменного свечения КТ Ag_2S , свободных от взаимодействия с НСт Au. Увеличение квантового выхода люминесценции КТ Ag_2S в присутствии плазмонных НСт Au сопровождается сокращением времени затухания люминесценции от 77 до 58 нс (рис. 2а, врезка, кривые 1,3), что может указывать и на реализацию эффекта Парселла в исследуемых плазмон-экситонных смесях [12, 13, 18–21, 31].

Наиболее интересные закономерности обнаружены в случае плазмон-экситонных смесей на основе КТ Ag_2S и металлических НСт Au длиной 30 и 35 нм, обеспечивающих отстройку спектрального резонанса экстинкции НСт от полосы люминесценции КТ на 80–110 нм (рис. 2а, кривые 1–3). В этом случае наблюдается асимметрия контура полосы люминесценции КТ Ag_2S , которая проявляется в снижении пиковой интенсивности свечения (820 нм) с одновременным увеличением интенсивности на краю полосы в области 720 нм (рис. 2а, кривая 4) или в области 900 нм (рис. 2а, кривая 5) при отстройке спектрального резонанса на 110 и 80 нм соответственно. При этом установлено увеличение среднего времени затухания люминесценции от 94 до 115 нс на длине волны 720 нм (900 нм) (рис. 2а, врезка, кривые 1, 2) и его уменьшение от 94 до 16 нс на длине волны 820 нм (рис. 2а, врезка, кривые 1, 3). Наблюдаемые спектральные закономерности являются проявлением экситон-плазмонного взаимодействия и могут быть интерпретированы как эффект Фано [13, 15–17]. Немонотонное изменение спектрального контура полосы люминесценции КТ Ag_2S при изменении отстройки спектрального резонанса плазмонного пика НСт Au от полосы люминесценции КТ Ag_2S в пределах 30 нм (рис. 2б, кривые 1, 2, 4, 5) может быть обусловлено дисперсией по размеру и разбросом расстояний меж-

ду компонентами в плазмон-экситонной смеси и др. Таким образом, полученные экспериментальные данные, безусловно, требуют теоретического описания для каждого конкретного случая. В свою очередь учет параметров ансамбля излучателей и плазмонных наночастиц в рамках теоретического описания, наблюдаемых экспериментально эффектов плазмон-экситонного взаимодействия, является сложной задачей и требует отдельного и подробного рассмотрения.

4. Заключение

В работе представлены экспериментальные данные, демонстрирующие проявления эффектов плазмон-экситонного взаимодействия в люминесцентных свойствах коллоидных КТ Ag_2S в зависимости от степени перекрытия их полосы люминесценции с пиком плазмонного резонанса металлических НСт Au. Установлено, что в условии спектрального резонанса соответствующих пиков управление квантовым выходом люминесценции достигается за счет изменения расстояния между компонентами плазмон-экситонной смеси. В свою очередь, отстройка от спектрального резонанса на 80–110 нм за счет изменения длины НСт Au приводит к снижению квантового выхода люминесценции КТ Ag_2S и асимметрии контура полосы люминесценции КТ Ag_2S . Такое поведение люминесцентных свойств является результатом реализации эффекта Фано, спектральное проявление которого осложнено влиянием дисперсии КТ в ансамбле и разбросом взаимных расстояний компонентов.

Заявленный вклад авторов

Гревцева И. Г. – постановка задачи, развитие методологии, проведение исследований, написание и редактирование текста. Овчинников О. В. – научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, итоговые выводы. Смирнов М. С. – концепция исследования, проведение исследования, написание обзора и редактирование текста. Асланов С. В. – проведение исследований, написание обзора. Асташкина М. С. – проведение исследований, редактирование текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Cotta M. A. Quantum dots and their applications: What lies ahead? *ACS Applied Nano Materials*. 2020;3(6): 4920–4924. <https://doi.org/10.1021/acsnm.0c01386>
2. Bera D., Qian L., Tseng T. K., Holloway P. H. Quantum dots and their multimodal applications: a review. *Materials*. 2010;3(4): 2260–2345. <https://doi.org/10.3390/ma3042260>
3. Reshma V. G., Mohanan P.V. Quantum dots: applications and safety consequences. *Journal of Luminescence*. 2019;205: 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.09.015>
4. Perepelitsa A. S., Aslanov S. V., Ovchinnikov O. V., ... Kondratenko T. S. Photosensitising reactive oxygen species with titanium dioxide nanoparticles decorated with PbS quantum dots. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(2): 215–224. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11103>
5. Caponetti V., Trzcinski J. W., Cantelli A., ... Montalti M. Self-assembled biocompatible fluorescent nanoparticles for bioimaging. *Frontiers in Chemistry*. 2019;7:168. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00168>
6. Gu Yi-P., Cui R., Zhang Z.-L., Xie Z.-X., Pang D.-W. Ultrasmall near-infrared Ag₂Se quantum dots with tunable fluorescence for in vivo imaging. *American Chemical Society*. 2012;134(1): 79–82. <https://doi.org/10.1021/ja2089553>
7. Park Y. S., Roh J., Diroll B. T., Schalle R. D., Klimov V. I. Colloidal quantum dot lasers. *Nature Reviews Materials*. 2021;6(5): 382–401. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00274-9>
8. Gurchenko V. S., Mazinov A. S., Smirnov M. S., Grevtseva I. G., Nesterenko L. P., Ovchinnikov O. V. Photoelectric response in sandwich structures based on condensed layers of Ag₂S quantum dots passivated with thioglycolic acid. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(2): 190–197. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11100>
9. Yin Q., Zhang W., Zhou Y., Wang R., Zhao Z., Liu C. High efficiency luminescence from PbS quantum dots embedded glasses for near-infrared light emitting diodes. *Journal of Luminescence*. 2022;250: 119065. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119065>
10. Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Kondratenko T. S., ... Perepelitsa A. S. Förster resonance energy transfer in hybrid associates of colloidal Ag₂S quantum dots with thionine molecules. *Journal of Nanoparticle Research*. 2017;19(12): 403. <https://doi.org/10.1007/s11051-017-4093-2>
11. Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V., Grevtseva I. G., ... Kondratenko T. S. Control of direction of nonradiative resonance energy transfer in hybrid associates of colloidal Ag₂S/TGA QDs with thionine molecules. *Journal of Nanoparticle Research*. 2019;21(4): 67. <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4487-4>
12. Guo R., Derom S., Väkeväinen A. I., ... Törmä P. Controlling quantum dot emission by plasmonic nanoarrays. *Optics Express*. 2015;23: 28206–28215. <https://doi.org/10.1364/OE.23.028206>
13. Luo Y., Zhao J. Plasmon-exciton interaction in colloiddally fabricated metal nanoparticle-quantum emitter nanostructures. *Nano Research*. 2019;12(9): 2164–2171. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2390-z>
14. Gupta S. N., Bitton O., Neuman T., ... Haran G. Complex plasmon-exciton dynamics revealed through quantum dot light emission in a nanocavity. *Nature Communications*. 2021;12: 1310. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21539-z>
15. He Y., Zhu K.-D. Fano effect and quantum entanglement in hybrid semiconductor quantum dot-metal nanoparticle system. *Sensors*. 2017;17(6): 1445. <https://doi.org/10.3390/s17061445>
16. Chen H.-J. Fano resonance induced fast to slow light in a hybrid semiconductor quantum dot and metal nanoparticle system. *Laser Physics Letters*. 2020;17: 025201. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab60ac>
17. Westmoreland D. E., McClelland K. P., Perez K. A., Schwabacher J. C., Zhang Z., Weiss E. A. Properties of quantum dots coupled to plasmons and optical cavities. *The Journal of Chemical Physics*. 2019;151: 210901 <https://doi.org/10.1063/1.5124392>
18. Grevtseva I., Ovchinnikov O., Smirnov M., ... Selyukov A. IR luminescence of plexitonic structures based on Ag₂S/L-Cys quantum dots and Au nanorods. *Optics Express*. 2022;30: 4668–4679. <https://doi.org/10.1364/OE.447200>
19. Derepko V. N., Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., ... Turishchev S. Yu. Plasmon-exciton nanostructures, based on CdS quantum dots with exciton and trap state luminescence. *Journal of Luminescence*. 2022;248: 118874. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.118874>
20. He R., Meunier M., Dong Zh., Liu X. Interplay of Purcell effect and extraction efficiency in CsPbBr₃ quantum dots coupled to Mie resonators. *Nanoscale*. 2023;15: 1652–1660. <https://doi.org/10.1039/D2NR05945B>
21. Borrero Landazabal D., Meza Olivo A., Garay Palmett K., Montiel R. S. Reduction of the fluorescence lifetime of quantum dots in presence of plasmonic nanostructures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1159: 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1159/1/012004>
22. Ruiz D., del Rosal B., Acebrón M., ... Juárez B. H. Ag/Ag₂S nanocrystals for high sensitivity near-infrared luminescence nanothermometry. *Advanced Functional Materials*. 2017;27(6): 1604629-1-9. <https://doi.org/10.1002/adfm.201604629>
23. Grevtseva I. G., Chevychelova T. A., Derepko V. N., ... Parshina A. S. Spectral manifestations of

the exciton-plasmon interaction of Ag₂S quantum dots with silver and gold nanoparticles. *Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(1): 25–31. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3294>

24. Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Grevtseva I. G., ... Kondratenko T. S. Luminescent properties of colloidal mixtures of Zn_{0.5}Cd_{0.5}S quantum dots and gold nanoparticles. *Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(1): 49–55. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3302>

25. Oh E., Huston A. L., Shabaev A., ... Medintz I. L. Energy transfer sensitization of luminescent gold nanoclusters: more than just the classical Förster mechanism. *Scientific Reports*. 2016;6: 35538. <https://doi.org/10.1038/srep35538>

26. Kamat P. V., Shinghavi B. Interparticle electron transfer in meta/semiconductor composites. Picosecond dynamics of CdS-capped gold nanoclusters. *The Journal of Physical Chemistry B*. 1997;101: 7675–7679. <https://doi.org/10.1021/jp9709464>

27. Mondal N., Samanta A. Ultrafast charge transfer and trapping dynamics in a colloidal mixture of similarly charged CdTe quantum dots and silver nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016;120: 650–658. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08630>

28. 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;9: 37312–37320. <https://doi.org/10.1039/C9RA07047H>

29. Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag₂S quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2020;227: 117526. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117526>

30. Зейниденов А. К., Ибраев Н. Х., Кучеренко М. Г. Влияние наночастиц серебра на электронные переходы в молекулах красителей и генерационные характеристики жидкостных лазеров на их основе. *Вестник ОГУ*. 2014;9(170): 96–102. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23161960>

31. Purcell E. M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. In: *Confined Electrons and Photons*. Burstein E., Weisbuch C. (eds). NATO ASI

Series. Springer, Boston, MA. 1995. vol. 340. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1963-8_40

Информация об авторах

Гревцева Ирина Геннадьевна, к. ф.-м. н., доцент кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1964-1233>
grevtseva_ig@inbox.ru

Овчинников Олег Владимирович, д. ф.-м. н., декан физического факультета, профессор кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6032-9295>
ovchinnikov_o_v@rambler.ru

Смирнов Михаил Сергеевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8765-0986>
smirnov_m_s@mail.ru

Латышев Анатолий Николаевич, д. ф.-м. н., профессор-консультант кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7271-0795>
latyshev@phys.vsu.ru

Асланов Сергей Владимирович, к. ф.-м. н., преподаватель кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-3961-2480>
windmaster7@yandex.ru

Асташкина Марина Сергеевна, аспирант кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

marina_kush@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023; одобрена после рецензирования 06.12.2023; принята к публикации 15.12.2024; опубликована онлайн 01.10.2024.