

Оригинальные статьи

Научная статья

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3294>

УДК 535.331, 546.55/.59

Спектральные проявления плазмон-экситонного взаимодействия квантовых точек Ag_2S с наночастицами серебра и золота

И. Г. Гревцева, Т. А. Чевычелова, В. Н. Дерепко, О. В. Овчинников✉, М. С. Смирнов, А. С. Перепелица, А. С. Паршина

Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Исследование направлено на разработку приемов создания гибридных наноструктур на основе коллоидных квантовых точек Ag_2S и наночастиц серебра пирамидальной геометрии, а также наностержней золота, и установление в таких структурах спектрально-люминесцентных проявлений плазмон-экситонного взаимодействия. Объектами исследования служили квантовые точки Ag_2S , пассивированных тиогликолевой кислотой (КТ Ag_2S/TGA) и 2-меркаптопропионовой кислотой (КТ $Ag_2S/2-MPA$), наностержни золота (НСт Au), наночастицы серебра (НЧ Ag) пирамидальной геометрии и их смеси. Спектральные свойства исследовали с помощью USB2000+ с модулем ФЭУ РМС-100-20 (Becker&Hickl Germany). Рассмотрена трансформация спектров люминесценции коллоидных КТ Ag_2S/TGA и КТ $Ag_2S/2-MPA$ в смесях с НЧ Ag пирамидальной формы и НСт Au. Установлены эффекты трансформации контуров спектров люминесценции вследствие эффекта Фано, а также тушения люминесценции при непосредственном контакте КТ и НЧ.

Ключевые слова: наночастицы серебра и золота, квантовые точки сульфида серебра, гибридные наноструктуры, спектр люминесценции

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ, проект НШ-2613.2020.2. 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., Чевычелова Т. А., Дерепко В. Н., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Перепелица А. С., Паршина А. С. Спектральные проявления плазмон-экситонного взаимодействия квантовых точек Ag_2S с наночастицами серебра и золота. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 25–31. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3294>

For citation: Grevtseva I. G., Chevychelova T. A., Derepko V. N., Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Perepelitsa A. S., Parshina A. S. Spectral manifestations of plasmon-exciton interaction of Ag_2S quantum dots with nanoparticles of silver and gold. *Kondensirovannyyesredy i mezhfaznyegranitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(1): 25–31. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3294>

✉ Овчинников Олег Владимирович, e-mail: ovchinnikov_o_v@rambler.ru

© Гревцева И. Г., Чевычелова Т. А., Дерепко В. Н., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Перепелица А. С., Паршина А. С., 2021



1. Введение

Металлические наночастицы (НЧ), полупроводниковые квантовые точки (КТ) и гибридные структуры на их основе перспективны для решения ряда фундаментальных и научно-прикладных проблем в биологии, медицине, химии, оптоэлектронике, фотокатализе и т. д. [1–10]. Для большинства указанных приложений имеется существенная потребность в создании сенсоров различного назначения. В их числе люминесцентные термометры, датчики pH, люминесцентные индикаторы примесных ионов, биосенсоры, построенные на люминесценции КТ и красителей, а также на рассеянии света от плазмонных НЧ и т. п. Существует возможность управления спектральным положением плазмонного резонанса металлических НЧ не только за счет изменения размера [3, 4], формы [11], их диэлектрического окружения [12], но вследствие изменения структуры их интерфейсов, например, путем их декорирования полупроводниковыми КТ, спектр люминесценции которых частично или полностью перекрывается с плазмонным пиком в экстинкции света. Создание гибридных наноструктур с «плазмон-экситонным» взаимодействием, составленных из плазмонных НЧ и полупроводниковых КТ, может приводить к высокой чувствительности спектра излучения подобного рода гибридных наноструктур к примеси, окружению, свойствам окружающего раствора или матрицы. Этим достигаются уникальные сенсорные свойства гибридных наноструктур, проявляющих не только аддитивность свойств отдельных компонентов, но и новые уникальные свойства, определяющиеся как непосредственным взаимодействием компонентов, так и их непосредственной близостью друг к другу [6–18]. При этом вариация режимов связи экситона и плазмона (слабая, промежуточная и сильная) делает возможным резонансные спектрально-люминесцентные эффекты в режиме слабого (эффект Перселла), промежуточного (эффект Фано) и сильного (расщепление Раби) плазмон-экситонного взаимодействия [14, 19–21]. Для таких гибридных систем принципиальны типы возникающих взаимодействий и взаимное расстояние компонентов гибридных наноструктур. Принципиальное значение в этом случае имеет прогнозирование спектрально-люминесцентных свойств гибридных наноструктур. В литературе этот вопрос рассмотрен не в полной мере. Таким образом, исследования, посвященные синтезу наноструктур и изучению их опти-

ческих свойств, являются актуальными. В основе решения данной проблемы лежит разработка подходов к созданию гибридных наноструктур в рамках технологии, обеспечивающей различные режимы плазмон-экситонного взаимодействия НЧ металлов с КТ и молекулами красителей, а также настройку оптических резонансов компонентов гибридной наноструктуры.

Данная работа посвящена разработке приемов создания гибридных наноструктур на основе коллоидных КТ Ag_2S и НЧ серебра (НЧ Ag) пирамидальной геометрии, а также наностержней золота (НСт Au), и установление в таких структурах спектрально-люминесцентных проявлений плазмон-экситонного взаимодействия.

2. Экспериментальная часть

2.1. Образцы для исследований

Коллоидные КТ Ag_2S , пассивированные молекулами тиогликолевой кислоты (КТ Ag_2S/TGA) и 2-меркаптопропионовой кислоты (КТ $Ag_2S/2-MPA$) средним размером 2.0 и 2.8 нм соответственно синтезировали в рамках одношаговой методики синтеза, которая предполагает использование в процессе кристаллизации молекул TGA и 2-MPA, как в качестве источника серы, так и в качестве пассиватора интерфейсов КТ [22, 23]. Данный подход заключается в смешивании исходных реагентов $AgNO_3$ (2.4 мМ) и TGA(2-MPA) (4.8 мМ). В случае использования TGA для пассивации интерфейсов КТ в качестве растворителя использовали дистиллированную воду, а при использовании 2-MPA синтез осуществляли в вязкой среде (этиленгликоль).

Методика синтеза НЧ Ag пирамидальной геометрии основана на комбинированном методе восстановления Ag цитратом натрия ($Na_3C_6H_5O_7$) и боргидридом натрия ($NaBH_4$). Для этого при комнатной температуре и постоянном перемешивании, в водный раствор $AgNO_3$ (50 мл, 0.02 М) поочередно вливали 0.5 мл PVP (0.003 М), 3 мл $Na_3C_6H_5O_7$ (0.03 М) 0.2 мл H_2O_2 (30 %) и 0.5 мл $NaBH_4$ (0.05 моль). На данном этапе формировались частицы преимущественно сферической формы. Воздействие на коллоидный раствор оптического излучения с длиной волны 520 нм при непрерывном перемешивании приводило к формированию пирамидальных НЧ Ag.

Формирование НСт Au в рамках коллоидного синтеза осуществляли в присутствии поверхностно активного вещества (ПАВ) цетилтриметиламмония бромида (ЦТАБ), водный раствор которого образует мицеллы цилиндрического вида,

тем самым создавая анизотропные условия для роста НСт. Процедура получения НСт Au является многостадийной и заключалась в последовательном приготовлении и смешивании затравочного и ростового растворов. В качестве затравочного раствора использовали раствор сферических НЧ Au (3 нм), полученного в результате химического восстановления HAuCl_4 (7 мкл, 0.36 М) раствором NaBH_4 (1.0 мл, 5 мМ) в присутствии ЦТАБ (20 мл, 0.02 мМ). Ростовый раствор получали в результате смешивания HAuCl_4 (28 мкл, 0.36 М), ЦТАБ (50 мл, 0.1 мМ), AgNO_3 (100 мкл, 0.02 М) и $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (5 мл, 0.05 мМ). После внесения затравочного раствора в ростовой, реакционная смесь постепенно приобретает синюю, фиолетовую или красно-бурую окраску в зависимости от отношения длины к диаметру НСт Au. Добавление в ростовой раствор варьруемого количества AgNO_3 обеспечивало управление отношения длины к диаметру НСт Au. Полученные НСт Au очищали от продуктов реакции посредством нескольких циклов центрифугирования-диспергирования.

Формирование гибридных структур осуществляли путем смешивания коллоидных растворов НСт Au (пирамидальных НЧ Ag) и КТ $\text{Ag}_2\text{S/TGA}$ (КТ $\text{Ag}_2\text{S/2-MPA}$) в молярном соотношении $[\nu(\text{НЧ})]:[\nu(\text{КТ})] \sim 10^{-4}$ м.д.

2.2. Методики экспериментальных исследований

Размер и морфологию КТ $\text{Ag}_2\text{S/TGA}$, КТ $\text{Ag}_2\text{S/2-MPA}$, пирамидальных НЧ Ag и НСт Au устанавливали с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Libra 120 (Carl Zeiss, Germany). Исследование абсорбционных свойств осуществляли с использованием спектрометра USB2000+ (Ocean Optics, USA) с источником излучения USB-DT (Ocean Optics, USA). Спектры люминес-

ценции и кинетику затухания люминесценции КТ $\text{Ag}_2\text{S/TGA}$, КТ $\text{Ag}_2\text{S/2-MPA}$ и их смесей с плазмонными НЧ 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 NDV7375 (Nichia, Japan) с излучением на длине волны 405 нм (200 мВт).

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены ПЭМ изображения пирамидальных НЧ Ag и НСт Au. Анализ ПЭМ изображений показал формирование пирамидальных НЧ Ag со средним значением длины ребра 19 нм (рис. 1а). Фотоиндуцированная трансформация морфологии НЧ Ag от сферической к пирамидальной с последующим увеличением размера приводит к длинноволновому сдвигу максимума экстинкции света от 480 до 590 нм (рис. 2а, пунктир).

Используемый подход к синтезу НСт Au обеспечил формирование и управление средними размерами (отношение длины к диаметру) НСт Au от $20 \div 9$ нм до $25 \div 9$ нм (рис. 1б) за счет добавления в ростовой раствор НСт Au 100 мкл и 70 мкл AgNO_3 (0.02 М) соответственно. Увеличение длины НСт Au приводит к длинноволновому сдвигу максимума в спектре экстинкции света от 640 до 690 нм соответственно (рис. 2б, пунктир).

Согласно данным, полученным с помощью ПЭМ, используемые подходы к синтезу смесей КТ Ag_2S и НЧ Ag и НСт Au обеспечивали совместимость компонентов и формирование гибридных структур. ПЭМ изображения демонстрируют наибольшее скопление КТ вблизи НЧ Ag и НСт Au (рис. 1).

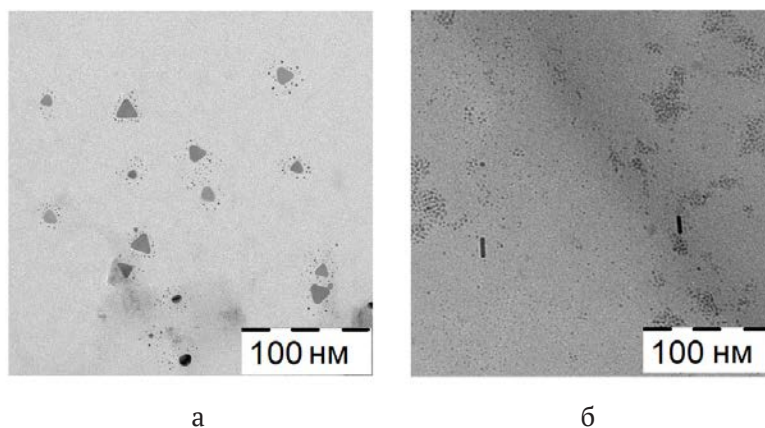


Рис. 1. ПЭМ – изображения, демонстрирующие формирование ассоциатов КТ Ag_2S с наночастицами Ag пирамидальной формы (а), и НСт Au (б)

Спектры оптического поглощения КТ Ag_2S/TGA и $Ag_2S/2-MPA$ были смещены в коротковолновую область относительно края фундаментального поглощения монокристаллов сульфида серебра (1.09 эВ), что связано с проявлением квантово-размерного эффекта. В спектре поглощения света коллоидными КТ Ag_2S/TGA наблюдалась особенность в области 590 нм, характерная для наиболее вероятного экситонного перехода в поглощении. Для коллоидных КТ Ag_2S/TGA при возбуждении излучением с длиной волны 405 нм наблюдали рекомбинационную люминесценцию, максимум полосы которой располагался при 615–620 нм (рис. 2а, б).

Спектр поглощения коллоидных КТ $Ag_2S/2-MPA$ имеет явно выраженный максимум около 690 нм, соответствующий наиболее вероятному экситонному переходу в оптическом поглощении. Для коллоидных КТ $Ag_2S/2-MPA$ наблюдали рекомбинационную люминесценцию,

максимум полосы которой располагался при 820 нм (рис. 2в).

Таким образом, геометрия и размеры НЧ Ag пирамидальной формы (19 нм) и НСт Au (20±9) обеспечили значительное перекрытие спектров их экстинкции со спектрами люминесценции КТ Ag_2S/TGA (620 нм) (рис. 2а, б). Для смеси НСт Au (25±9) и КТ $Ag_2S/2-MPA$ (820 нм) значительного перекрытия спектра экстинкции и спектра люминесценции КТ $Ag_2S/2-MPA$ не было достигнуто (рис. 2в).

В смесях КТ Ag_2S/TGA и $Ag_2S/2-MPA$ с плазмонными НЧ Ag пирамидальной геометрии и НСт Au в спектрах экстинкции наблюдали сложные полосы, не являющиеся простой суммой спектров компонентов смесей. Отмечено увеличение оптической плотности по всему спектру экстинкции при смешивании КТ и НЧ. Несовпадение положения максимумов полос ослабления компонентов и перераспределение интенсивностей в пределах результирующих контуров ука-

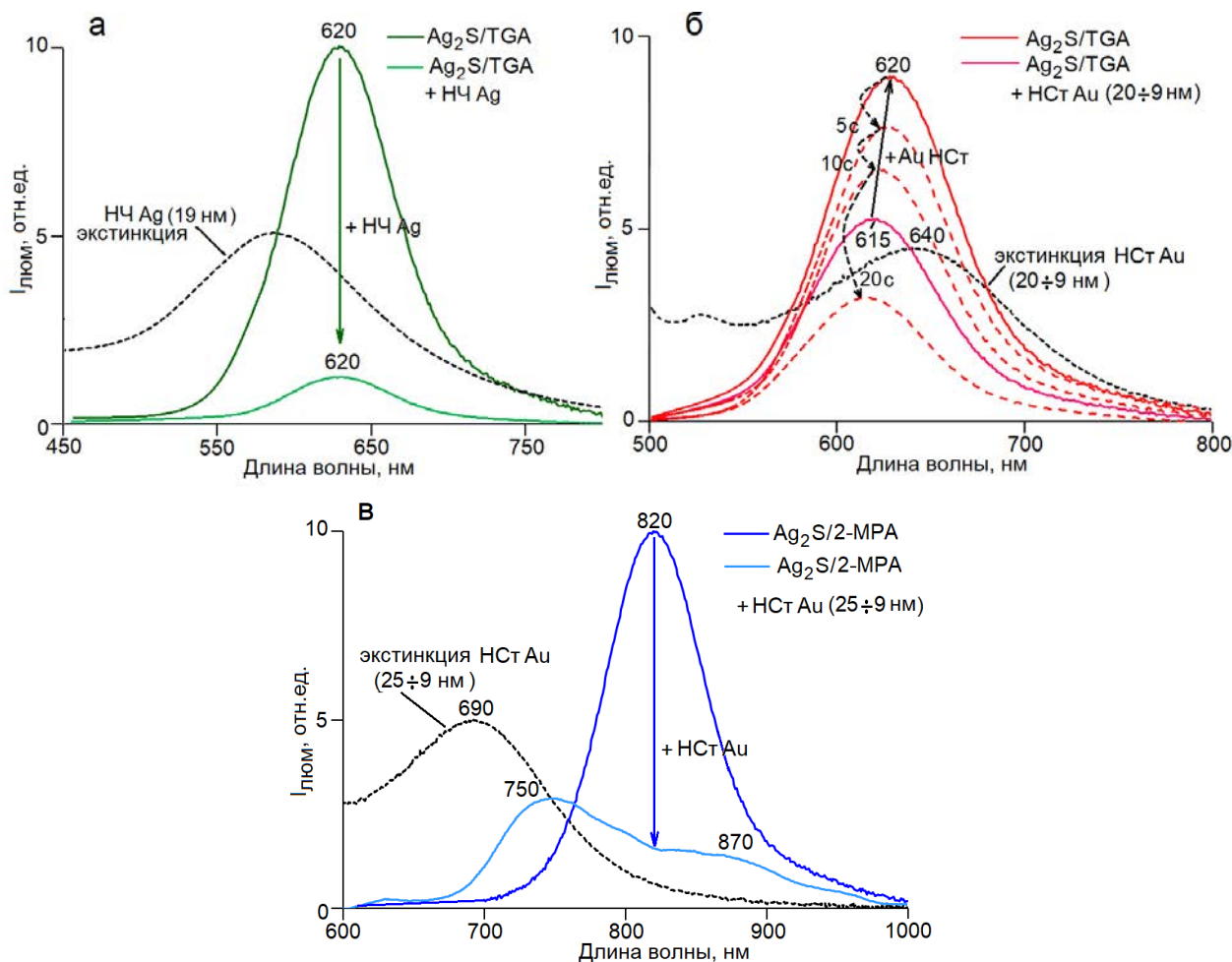


Рис. 2. Спектры экстинкции света НЧ Ag пирамидальной формы (а), и НСт Au размером (20±9) нм (б) и (25±9) нм (в), спектры люминесценции КТ Ag_2S/TGA (а и б), КТ $Ag_2S/2-MPA$ (в) и их смесей НЧ

зывает на возникновение плазмон-экситонного взаимодействия между компонентами.

Однако наиболее интересные закономерности обнаружены в спектрах люминесценции КТ, находящихся в смеси с плазмонными НЧ. В смесях КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ (максимум люминесценции 620 нм) с НЧ Ag (максимум экстинкции света 590 нм) наблюдали уменьшение в 8 раз интенсивности люминесценции КТ (рис. 2а), сопровождающееся уменьшением на 5–7 % времени жизни люминесценции. Наблюдаемые закономерности свидетельствуют в пользу доминирующего над эффектами плазмон-экситонного взаимодействия процесса фотопереноса носителей между компонентами ассоциатов, блокирующего люминесценцию при неполном перекрытии пика экстинкции НЧ Ag (мода нанорезонатора) и люминесценции КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ [10, 24].

В смесях тех же образцов КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ с плазмонными НЧ Au ($20 \div 9$ нм) в условиях большей степени перекрытия спектров люминесценции (620 нм) и плазмонного пика (640 нм), наоборот, обнаружено возрастание квантового выхода люминесценции в 1.5 раза (рис. 2б). При этом отмечено падение интенсивности рекомбинационной люминесценции КТ ниже уровня свечения исходного образца КТ за 20 секунд воздействия возбуждающих фотонов. Исходный рост интенсивности люминесценции КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ является проявлением эффекта Перселла, проявляющегося в увеличении вероятности оптического перехода вблизи нанорезонатора [25]. Однако дальнейшее заметное падение интенсивности люминесценции обусловлено, вероятно, фотостимулированным переносом заряда между компонентами рассматриваемых ассоциатов, который, как известно, приводит к блокировке люминесценции [10, 24]. Неполное тушение люминесценции свидетельствует о том, что часть КТ не имеет плотного контакта с НЧ, обеспечивающего инжекцию фотовозбужденных носителей заряда.

В смесях НСт Au ($25 \div 9$ нм, пик экстинкции 690 нм) и КТ $\text{Ag}_2\text{S}/2\text{-MPA}$ найдено уменьшение интенсивности люминесценции КТ в максимальной полосе (820 нм). Для рассматриваемой ситуации отмечена сильная трансформация спектрального контура полосы люминесценции КТ $\text{Ag}_2\text{S}/2\text{-MPA}$. Наряду с уменьшением пиковой интенсивности, наблюдался её рост в области короче 700 нм (рис. 2в). Такое интересное поведение спектра люминесценции, по-видимому, связано с проявлением квантовой интерферен-

ции (антирезонанс Фано) при экситон-плазмонном взаимодействии [26]. При этом установлено увеличение среднего времени жизни люминесценции с 94 до 115 нс на длине волны 750 нм и его уменьшением с 94 до 16 нс на длине волны 820 нм, что также свидетельствует о возникновении экситон-плазмонного взаимодействия. Разгорание люминесценции в области 700 нм может быть связано с эффектом Перселла для ситуации, когда между плазмонной наночастицей и квантовыми точками наблюдается непосредственный контакт. Замедление затухания люминесценции обусловлено уменьшением эффективности безызлучательной рекомбинации, вызванное изменением ближайшего окружения КТ.

4. Выводы

Разработана техника получения гибридных ассоциатов на основе КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ и $\text{Ag}_2\text{S}/2\text{-MPA}$ и НЧ Ag пирамидальной формы и НСт Au. Установлены эффекты трансформации контуров спектров люминесценции вследствие эффекта интерференции квантовых состояний (эффект Фано), а также тушения люминесценции при непосредственном контакте КТ и НЧ. Обнаруженные проявления взаимодействия КТ Ag_2S и плазмонных наночастиц указывают на существование возможности для управления спектром и квантовым выходом ИК люминесценции КТ. Однако полученные новые экспериментальные результаты однозначно свидетельствуют о сложной картине проявления экситон-плазмонного взаимодействия в исследуемых системах ввиду одновременного проявления нескольких эффектов, таких как эффект Перселла, Фано, фотоиндуцированный перенос заряда между КТ и НЧ.

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. Fantoni A., Fernandes M., Vygranenko Y., Louro P., Vieira M., Silva R. P. O., Texeira D., Ribeiro A. P. C., Prazeres M., Alegria E. C. B. A. Analysis of metallic nanoparticles embedded in thin film semiconductors for optoelectronic applications. *Optical and Quantum Electronics*. 2018;50(246): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11082-018-1523-z>
2. Hentschel M., Metzger B., Knabe B., Buse K., Giessen H. Linear and nonlinear optical properties of hybrid metallic–dielectric plasmonic nanoantennas.

- Beilstein J. Nanotechnol.* 2016;7(111): 111–120. <https://doi.org/10.3762/bjnano.7.13>
3. Khan I., Saeed K., Khan I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry.* 2019;12(7): 908–931. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2017.05.011>
 4. Daniel M. C., Astruc D. Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology. *Chemical Reviews.* 2004;104(1): 293–346. <https://doi.org/10.1021/cr030698+>
 5. Garcia M. A. Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2011;44(28): 283001(1–20). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/28/283001>
 6. 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>
 7. Kim K.-S., Kim J.-H., Kim H., Laquai F., Arifin E., Lee J.-K., Yoo S., Sohn B.-H. Switching Off FRET in the hybrid assemblies of diblock copolymer micelles, quantum dots, and dyes by plasmonic nanoparticles. *ACS Nano.* 2012;6(6): 5051–5059. <https://doi.org/10.1021/nn301893e>
 8. Ovchinnikov O. V., Kondratenko T. S., Grevtseva I. G., Smirnov M. S., Pokutnyi S. I. Sensitization of photoprocesses in colloidal Ag₂S quantum dots by dye molecules. *Journal of Nanophotonics.* 2016;10(3): 033505. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.10.033505>
 9. Овчинников О. В., Смирнов М. С., Шапиро Б. И., Шатских Т. С., Латышев А. Н., Хай Миен Ф. Т., Хохлов В. Ю. Спектральные проявления гибридной ассоциации коллоидных квантовых точек CdS с молекулами метиленового голубого. *Оптика и спектроскопия.* 2013;115(3): 389–397. <https://doi.org/10.7868/S0030403413090195>
 10. Кондратенко Т. С., Овчинников О. В., Гревцева И. Г., Смирнов М. С. Органо-неорганические наноструктуры для люминесцентной индикации в ближней ИК-области. *Письма в Журнал технической физики.* 2016;42(7): 59–64. Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43032>
 11. Etacheri V., Georgekutty R., Seery M. K., Pillai S. C. Single step morphology-controlled synthesis of silver nanoparticles. *MRS Proceedings.* 2009;1217: 1217-Y08-40. <https://doi.org/10.1557/PROC-1217-Y08-40>
 12. Shah K. W., Sreethawong T., Liu S. H., Zhang S. Y., Li S. T., Han M. Y. Aqueous route to facile, efficient and functional silica coating of metal nanoparticles at room temperature. *Nanoscale.* 2014;6(19): 11273–11282. <https://doi.org/10.1039/c4nr03306j>
 13. Fedutik Y., Temnov V. V., Schöps O., Woggon U., Artemyev M. V. Exciton-plasmon-photon conversion in plasmonic nanostructures. *Physical Review Letters.* 2007;99(13): 136802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.136802>
 14. Zhang W., Govorov A. O., Bryant G. W. Semiconductor-metal nanoparticle molecules: hybrid excitons and the nonlinear fano effect. *Physical Review Letters.* 2006;97(14): 146804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.146804>
 15. Hildebrandt N., Spillmann Ch. M., Algar W. R., Pons T., Stewart M. H., Oh E., Susumu K., Díaz S. A., Delehanty J. B., Medintz I. L. Energy transfer with semiconductor quantum dot bioconjugates: A versatile platform for biosensing, energy harvesting, and other developing applications. *Chemical Reviews.* 2017; 117(2): 536–711. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00030>
 16. Resch-Genger U., Grabolle M., Cavaliere-Jaricot S., Nitschke R., Nann T. Quantum dots versus organic dyes as fluorescent labels. *Nature Methods.* 2008;5(5): 763–775. <https://doi.org/10.1038/nmeth.1248>
 17. Иевлев В. М., Латышев А. Н., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Ключев В. Г., Холкина А. М., Утехин А. Н., Евлев А. Б. Фотостимулированное формирование центров антистоксовой, люминесценции в ионно-ковалентных кристаллах. *Доклады Академии наук.* 2006;409(6): 756–758. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9282299_47931344.PDF
 18. Овчинников О. В., Смирнов М. С., Латышев А. Н., Стаселько Д. И. Фотостимулированное формирование центров сенсibilизированной антистоксовой люминесценции в микрокристаллах AgCl(I). *Оптика и спектроскопия.* 2007;103(3): 497–504. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9551779_53545358.pdf
 19. Durach M., Rusina A., Stockman M. I., Nelson K., Toward full spatiotemporal control on the nanoscale. *Nano Letters.* 2007;7(10): 3145–3149. <https://doi.org/10.1021/nl071718g>
 20. Komarala V. K., Rakovich Yu. P., Bradley A. L. Off-resonance surface plasmon enhanced spontaneous emission from CdTe quantum dots. *Applied Physics Letters.* 2006;89(25): 253118. <https://doi.org/10.1063/1.2422906>
 21. Gong H. M., Wang X. H., Du Y. M., Wang Q. Q. Optical nonlinear absorption and refraction of CdS and CdS-Ag core-shell quantum dots. *The Journal of Chemical Physics.* 2006;125(2): 024707. <https://doi.org/10.1063/1.2212400>
 22. 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(64): 37312–37320. <https://doi.org/10.1039/C9RA07047H>

23. Kondratenko T. S., Zvyagin A. I., Smirnov M. S., Grevtseva I. G., Perepelitsa A. S., Ovchinnikov O. V. Luminescence and nonlinear optical properties of colloidal Ag_2S quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2019;208: 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.12.042>

24. Кондратенко Т. С., Гревцева И. Г., Звягин А. И., Овчинников О. В., Смирнов М. С. Люминесцентные и нелинейно-оптические свойства гибридных ассоциатов квантовых точек Ag_2S с молекулами тиазиновых красителей. *Оптика и спектроскопия*. 2018;124(5): 640–647. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.05.45945.310-17>

25. Purcell E. M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Physical Review*. 1946;69: 681. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1963-8_40

26. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts. *Physical Review*. 1961;124: 1866–1878. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.1866>

Информация об авторах

Гревцева Ирина Геннадьевна, к. ф.-м. н., преподаватель кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: grevtseva_ig@inbox.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1964-1233>.

Чевычелова Тамара Андреевна, аспирант кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: t.chevychelova@rambler.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8097-0688>.

Деренко Виолетта Николаевна, аспирант кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: viol.physics@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9096-5388>.

Овчинников Олег Владимирович, д. ф.-м. н., профессор кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ovchinnikov_o_v@rambler.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6032-9295>.

Смирнов Михаил Сергеевич, к. ф.-м. н., доцент кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: smirnov_m_s@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8765-0986>.

Перепелица Алексей Сергеевич, к. ф.-м. н., старший преподаватель кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: a-perepelitsa@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8097-0688>.

Паршина Анна Сергеевна, магистрант кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: anyuta_parshina@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9455-2062>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 25.12.2020; одобрена после рецензирования 13.01.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована онлайн 25.03.2021.