

Оригинальные статьи

Научная статья

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3302>

УДК 535.331, 546.55/.59

Люминесцентные свойства коллоидных смесей квантовых точек $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ с наночастицами золота

О. В. Овчинников[✉], М. С. Смирнов, И. Г. Гревцева, В. Н. Дерепко, Т. А. Чевычелова, Л. Ю. Леонова, А. С. Перепелица, Т. С. Кондратенко

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

Аннотация

Исследование посвящено установлению спектрально-люминесцентных проявлений эффектов взаимодействия в смесях коллоидных квантовых точек $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$, пассивированных 2-меркаптопропионовой кислотой, с наночастицами Au и Au/SiO₂. Исследуемые образцы квантовых точек $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$, наночастиц Au и Au/SiO₂ и их смесей получены методами коллоидного синтеза и охарактеризованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии. В качестве основных методов исследования в работе использованы абсорбционная, люминесцентная и время-разрешенная люминесцентная спектроскопия. Измерения проводились при температурах 77 и 300 К. Выполнено сравнение спектрально-люминесцентных свойств квантовых точек $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ свободных и находящихся во взаимодействии с наночастицами Au и Au/SiO₂. Установлена возможность управления люминесцентными свойствами квантовых точек $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ в условиях изменения плазмон-экситонной связи, достигаемой при формировании диэлектрической SiO₂ оболочки на поверхности наночастиц Au, а также при внесении полимера в коллоидную смесь.

Ключевые слова: квантовые точки $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$, наночастицы золота, core/shell, диоксид кремния (SiO₂), спектр экстинкции света, плазмон-экситонное взаимодействие

Благодарности: исследование выполнено в рамках 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: Овчинников О. В., Смирнов М. С., Гревцева И. Г., Дерепко В. Н., Чевычелова Т. А., Леонова Л. Ю., Перепелица А. С., Кондратенко Т. С. Люминесцентные свойства коллоидных смесей квантовых точек $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ с наночастицами золота. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 49–55. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3302>

For citation: Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Grevtseva I. G., Derepko V. N., Chevychelova T. A., Leonova L. Yu., Perepelitsa A. S., Kondratenko T. S. Luminescent properties of colloidal mixtures of $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ quantum dots with gold nanoparticles. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(1): 49–55. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3302>

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

© Овчинников О. В., Смирнов М. С., Гревцева И. Г., Дерепко В. Н., Чевычелова Т. А., Леонова Л. Ю., Перепелица А. С., Кондратенко Т. С., 2021



1. Введение

В последнее время большое внимание уделяется созданию гибридных наноструктур с «плазмон-экситонным» взаимодействием, построенных на основе металлических (плазмонных) наночастиц (НЧ), полупроводниковых квантовых точек (КТ) и/или молекул красителей [1–10]. Для таких гибридных систем спектры люминесценции КТ и красителей существенным образом зависят от присутствия металлических наночастиц (нанорезонаторов), поддерживающих моды, частота которых близка к частоте максимума люминесценции. Существенное значение для формирования результирующей спектральной картины также играет взаимное пространственное расположение компонентов смеси. Вариация этих параметров обеспечивает настройку режимов связи экситона и плазмона (слабая, промежуточная и сильная), что открывает возможность к управлению параметрами спектрально-люминесцентных свойств излучателя [10–12].

В литературе имеются исследования, направленные на выявление условий формирования плазмон-экситонных наноструктур, обеспечивающих резонансные эффекты в режиме слабого (эффект Перселла), промежуточного (эффект Фано) и сильного (расщепление Раби) плазмон-экситонного взаимодействия [1, 2, 6–13]. При этом обнаружены плазмон-индуцированное усиление/гашение флуоресценции [9], плазмон-усиленная Ферстеровская передача энергии [9], индуцированное экситон-плазмон-фотонное превращение [8]. Однако имеющиеся результаты исследований плазмон-экситонного взаимодействия не позволяют найти решение фундаментальной проблемы прогнозирования конечных люминесцентных свойств гибридных наноструктур.

Важно, что пока не развит единый подход к созданию гибридных наноструктур, обеспечивающий настройку режимов связи экситона и плазмона от слабой к промежуточной и сильной. Экспериментальные данные, полученные разными научными коллективами, противоречивы и варьируются в основном от флуоресцентного усиления до гашения, при этом отсутствуют важнейшие параметры и физически важные экспериментальные характеристики для объяснения процессов плазмон-экситонного взаимодействия. Отсутствие подробных экспериментальных данных и их слабая корреляция с результатами теоретических расчетов обусловлены сложной природой плазмон-экситонных взаимодейст-

вий. Также нераскрыта проблема формирования центров тушения люминесценции КТ при их взаимодействии с плазмонными НЧ и их роль в формировании конечных «гибридных» люминесцентных свойств плазмон-экситонных наноструктур. Таким образом, разработка приемов управления люминесцентными свойствами в гибридных наноструктурах, построенных на основе плазмонных НЧ и КТ и/или молекул красителей, представляется актуальной проблемой.

В данной работе представлены экспериментальные данные, демонстрирующие возможность управления люминесцентными свойствами КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ в ближнем поле сферических НЧ золота (Au). При этом специально были созданы условия для изменения плазмон-экситонной связи за счет формирования core/shell НЧ типа Au/SiO₂, а также дополнительного разделения компонентов смеси за счет внесения полимера, позволяющего изменять их взаимное расстояние.

2. Экспериментальная часть

Коллоидные КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$, пассивированные молекулами 2-меркаптопропионовой кислоты (2-МРА), синтезировали в рамках водной методики синтеза [16, 17]. Данный подход заключается в смешивании водных растворов прекурсоров $CdBr_2$ (224 мг, 50 мл) и $Zn(ClO_4)_2$ (242 мг, 10 мл) с последующим внесением в реакционную смесь 2-МРА (230 мкл) и доведением уровня pH до 7 при помощи 1 М раствора NaOH. Далее в коллоидный раствор вносили водный раствор Na_2S (30 мг, 10 мл).

Синтез сферических НЧ Au осуществляли в рамках метода Туркевича [14]. К кипящему 0.01 % водному раствору $HAuCl_4$ (200 мл) добавляли 1.4 мл 1 % раствора $Na_3C_6H_5O_7$. Полученную смесь кипятили в течение 30 минут при постоянном перемешивании. Формирование оболочки SiO₂ на поверхности НЧ Au (core/shell НЧ Au/SiO₂) осуществляли путем функционализации поверхности НЧ Au монослоем (3-меркаптопропил) триметоксисилан (3-МРТМС) с последующим формированием плотных слоев SiO₂ метасиликатом натрия ($Na_2O(SiO_2)_x$). Для этого 0.4 мл гидролизованного 0.035 % раствора 3-МРТМС смешивали с 30 мл раствора коллоидных НЧ Au. Далее в реакционную смесь добавляли водный раствор Na_2SiO_3 (96 мг, 10 мл). Колбу с реакционной смесью помещали на водяную баню при температуре 60 °С и непрерывном перемешивании в течение 6 ч.

Формирование гибридных структур осуществляли путем смешивания коллоидных растворов $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ с HЧ Au , HЧ Au в присутствии 4 % раствора полимера поли-(диаллилдиметиламмония хлорида) (PolyDADMAC) и core/shell HЧ Au SiO_2 в примерном молярном соотношении $[\nu(\text{KT})]:[\nu(\text{HЧ})] \sim 10^4$ м.д.

Размер и морфологию $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$, HЧ Au и HЧ Au/SiO_2 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 люминесценции и кинетику затухания люминесценции $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ исследовали с помощью USB2000+ и платы время-коррелированного однофотонного счёта TimeHarp-260 (PicoQuant Germany) с модулем ФЭУ РМС-100-20 (Becker&Hickl Germany) с временным разрешением, составляющим 0.2 нс. Для возбуждения люминесценции использовали диодный модуль HPL-N77GV1BT-V1 с излучением на длине волны 380 нм.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Структурные данные

Анализ ПЭМ изображений показал, что используемый подход к синтезу $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ обеспечивает формирование отдельных нанокристаллов средним размером 4.0 ± 0.5 нм (рис. 1а). Имеющаяся дисперсия по размерам в ансамблях $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S} \sim 35$ % обусловлена избранным подходом коллоидного синтеза в водном растворе.

На рис. 1б, в представлены ПЭМ изображения HЧ Au и core/shell HЧ Au/SiO_2 . Показано, что в рамках метода Туркевича формируются HЧ Au сферической формы. Средний диаметр сферических HЧ Au в ансамбле составляет 20 ± 3 нм

с распределением по размерам в пределах 30 % (рис. 1б). Анализ ПЭМ изображений core/shell HЧ Au/SiO_2 (рис. 1) показал формирование оболочки SiO_2 на поверхности HЧ Au толщиной 10 ± 3 нм, при этом коагуляция core/shell HЧ Au/SiO_2 практически отсутствует.

3.2. Спектрально-люминесцентные свойства смесей коллоидных $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ и наночастиц Au , Au/SiO_2

Характерная особенность для экситонного перехода [18] в оптическом поглощении $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ расположена в области 370 нм (рис. 2 а, кривая 1). Максимум спектра экстинкции света HЧ Au находится в области 525 нм (рис. 2 а, кривая 2). Внесение 4 % раствора полимера PolyDADMAC в раствор HЧ Au не оказывает влияние на положение максимума экстинкции света в области 525 нм. Формирование оболочки SiO_2 толщиной 10 нм на поверхности HЧ Au приводит к длинноволновому спектральному сдвигу максимума спектра экстинкции света HЧ Au от 525 к 538 нм за счет изменения общей диэлектрической проницаемости системы core/shell (рис. 2 а, кривая 3).

Для смесей $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ с HЧ Au результирующий спектр экстинкции света не является простой суммой спектров компонентов смесей. Смещение максимумов полос ослабления компонентов смеси, увеличение оптической плотности по всему спектру экстинкции указывает на проявление сильного плазмон-экситонного взаимодействия между компонентами смеси (рис. 2а, кривая 4). В случае смесей $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ с HЧ Au в присутствии полимера PolyDADMAC, а также с core/shell HЧ Au/SiO_2 , в результирующих спектрах экстинкции зафиксировано увеличение оптической плотности в области экситонного перехода $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ (рис. 2а, кривые 5, 6), обусловленное не только вкладом в общий

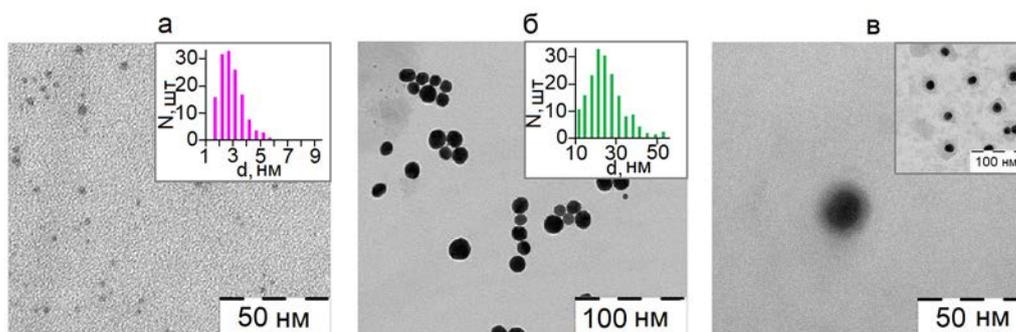


Рис. 1. ПЭМ изображения и гистограмма распределения по размерам $\text{KT Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ - (а); HЧ Au - (б); core/shell HЧ Au/SiO_2 с толщиной оболочки 10 нм - (в)

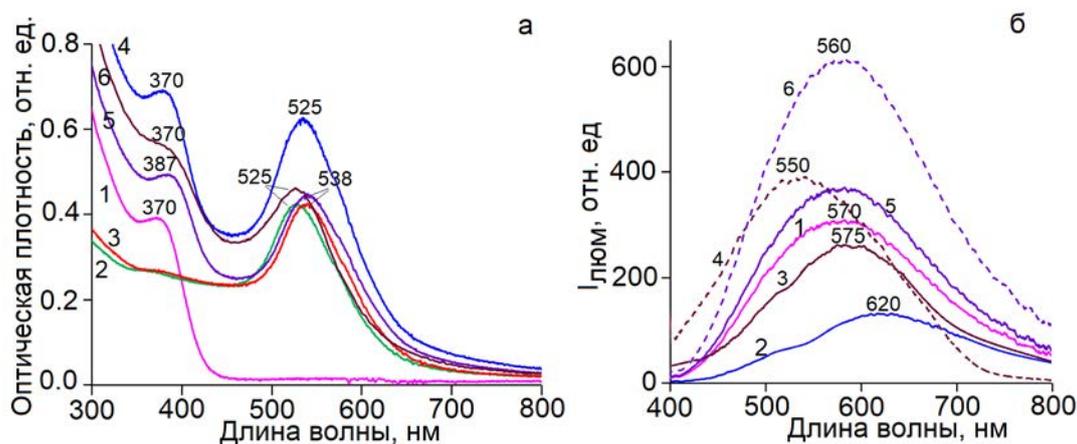


Рис. 2. (а) Спектры оптического поглощения КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ (1), спектры экстинкции НЧ Au, НЧ Au (PolyDADMAC) (2), НЧ core/shell НЧ Au/SiO₂ (3), спектры экстинкции смесей КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ Au (4), КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ Au (PolyDADMAC) (5), КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ core/shell НЧ Au/SiO₂ (6). (б) Спектры люминесценции КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ (1), смесей КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ Au при $T = 300$ К и $T = 77$ К (2), КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ Au (PolyDADMAC) при $T = 300$ К (3) и при $T = 77$ К (4), КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ core/shell НЧ Au/SiO₂ при $T = 300$ К (5) и при $T = 77$ К

спектральный контур экстинкции света от НЧ Au, но и слабым взаимодействием между компонентами смеси.

Управление размером и морфологией компонентов смеси в рамках используемых методов синтеза обеспечило значительное перекрытие пика экстинкции света НЧ Au (525 нм) и core/shell НЧ Au/SiO₂ (538 нм) со спектром люминесценции КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ (570 нм), что является важным условием проявления эффектов плазмон-экситонного взаимодействия в люминесцентных свойствах излучателя.

Для смесей КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ с НЧ Au продемонстрировано тушение люминесценции с трансформацией спектрального контура полосы свечения КТ, выраженной провалом в области 525 нм (рис. 2б, кривая 2). При этом время жизни люминесценции уменьшается от 21 нс до 4 нс. Понижение температуры исследуемых образцов до 77 К качественно не изменяет люминесцентных свойств смесей КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ Au. Такое поведение люминесцентных свойств свидетельствует о сложной картине плазмон-экситонного взаимодействия в исследуемых смесях ввиду одновременного проявления нескольких эффектов, например, таких как эффект Фано [1, 5, 10], безызлучательная рекомбинация [15, 19], вызванная изменением ближайшего окружения КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$. Увеличение расстояния между КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ Au с помощью полимера PolyDADMAC приводит к менее значительному тушению интенсивности люминесценции

КТ, также сопровождающимся трансформацией спектрального контура (рис. 2б, кривая 3). При этом время жизни люминесценции не изменяется. Понижение температуры до 77 К способствует гипсохромному смещению полосы люминесценции КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ в область 550 нм и разгоранию ее интенсивности в 1.5 раза (рис. 2б, кривая 4), сопровождающемуся увеличением времени жизни люминесценции от 23 до 25 нс. Контроль расстояния между компонентами смеси при помощи оболочки SiO₂ толщиной 10 нм на поверхности НЧ Au приводит к незначительному разгоранию люминесцентных свойств КТ при температуре 300 К (рис. 2б, кривая 5). При температуре 77 К интенсивность люминесценции КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ разгорается в 8 раз при этом время жизни люминесценции замедляется от 23 до 40 нс (рис. 2б, кривая 6). Такое поведение люминесцентных свойств может являться проявлением эффекта Перселла, усложненного влиянием эффектов экситон-фононного взаимодействия, концентрационного тушения и вероятного обмена электронными возбуждениями, всегда происходящими в гибридных системах, в том числе с участием состояний SiO₂ оболочки [1, 4, 11, 12, 20, 21].

Таким образом, взаимное пространственное распределение плазмонных НЧ Au и КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ в условиях значительного спектрального резонанса обеспечивает управление люминесцентными свойствами КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$, вероятно, за счет переключения режимов плаз-

мон-экситонной связи. Проявление резонансных эффектов в чистом виде осложнено множеством мешающих факторов, таких как электрон-фононное взаимодействие, резонансный безызлучательный перенос энергии между компонентами смеси.

3. Выводы

В данной работе продемонстрированы новые экспериментальные эффекты проявления взаимодействия между КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и НЧ Au, обусловленные изменением плазмон-экситонной связи между компонентами смеси за счет формирования оболочек SiO_2 толщиной 10 нм на поверхности НЧ Au, а также дополнительного внесения полимера в коллоидную смесь. Показано, что формирование смесей КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ с плазмонными НЧ Au сопровождается тушением интенсивности и трансформацией спектрального контура люминесценции КТ с одновременным уменьшением времени жизни люминесценции. Увеличение расстояния между компонентами смеси путем внесения полимера PolyDADMAC и формирования оболочки SiO_2 толщиной 10 нм на поверхности НЧ Au блокирует процесс тушения люминесценции при температуре 300 К и обеспечивает разгорание интенсивности люминесценции при температуре 77 К с одновременным увеличением времени жизни люминесценции. Полученные данные, демонстрируют возможность управления люминесцентными свойствами КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ в условиях переключения режимов плазмон-экситонного взаимодействия между компонентами смесей, а также однозначно свидетельствуют о сложной картине проявления экситон-плазмонного взаимодействия в исследуемых смесях, ввиду одновременного проявления нескольких эффектов, таких как эффект Перселла, Фано, безызлучательный перенос энергии от КТ к плазмонной частице, расстройка резонанса.

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. Luo Y., Zhao J. Plasmon-exciton interaction in colloidally fabricated metal nanoparticle-quantum emitter nanostructures. *Nano Research*. 2019;12(9): 2164–2171. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2390-z>

2. Левашов С. И., Краснок А. Е., Белов П. А., Мирошниченко А. Е. Гибридная нанофотоника. *УФН*. 2018;188(11): 1137–1154. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.12.038275>

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.arabjc.2017.05.011>

4. 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>

5. Андреева О. В., Сидоров А. И., Стаселько Д. И., Хрущева Т. А. Синтез и оптические свойства гибридных «плазмон-экситонных» наноструктур на основе Ag–AgI в нанопористом силикатном стекле. *Физика твердого тела*. 2012;54(6): 1215–1219. Режим доступа: journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/638

6. Chen G. Y., Chen Y. N., Chuu D. S. Spontaneous emission of quantum dot excitons into surface plasmons in a nanowire. *Optics Letters*. 2008;33(19): 2212–2214. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002212>

7. Akimov A. V., Mukherjee A., Yu C. L., Chang D. E., Zibrov A. S., Hemmer P. R., Park H., Lukin M. D. Generation of single optical plasmons in metallic nanowires coupled to quantum dots. *Nature*. 2007;450(7168): 402–406. <https://doi.org/10.1038/nature06230>

8. 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>

9. Govorov A. O., Lee J., Kotov N. A. Theory of plasmon-enhanced Förster energy transfer in optically excited semiconductor and metal nanoparticles. *Physical Review B*. 2007;76: 125308. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.125308>

10. Zhang W., Govorov A. O., Bryant G. W. Semiconductor-metal nanoparticle molecules: hybrid excitons and the nonlinear fano effect. *Physical Review Letters*. 2006;97: 146804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.146804>

11. Leng H., Szychowski B., Daniel M.-Ch., Pelton M. Strong coupling and induced transparency at room temperature with single quantum dots and gap plasmons. *Nature Communications*. 2018;9: 4012. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06450-4>

12. Cao En, Lin W., Sun M., Liang W., Song Yu. Exciton-plasmon coupling interactions: from principle

to applications. *Nanophotonics*. 2018;7(1): 145–167. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0059>

13. Pompa P. P., Martiradonna L., Torre A. D., Sala F. D., Manna L., Vittorio M. De, Calabi F., Cingolani R., Rinaldi R. Metal-enhanced fluorescence of colloidal nanocrystals with nanoscale control. *Nature Nanotechnology*. 2006;1: 126–130. <https://doi.org/10.1038/nnano.2006.93>

14. Turkevich J., Stevenson P. C., Hillier J. A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold. *Discussion Faraday Society*. 1951;11: 55–75. <https://doi.org/10.1039/df9511100055>

15. Krivenkov V., Dyagileva D., Samokhvalov P., Nabiev I., Rakovich Yu. Effect of spectral overlap and separation distance on exciton and biexciton quantum yields and radiative and nonradiative recombination rates in quantum dots near plasmon nanoparticles. *Annalen der Physik*. 2020;532(8): 2000236. <https://doi.org/10.1002/andp.202000236>

16. Смирнов М. С., Овчинников О. В., Хазаль Н. А. Р., Звягин А. И. Управление размерным эффектом в спектральных свойствах коллоидных квантовых точек $Zn_xCd_{1-x}S$. *Неорганические материалы*. 2018;54(5): 431–439. <https://doi.org/10.7868/S0002337X18050019>

17. Кондратенко Т. С., Смирнов М. С., Овчинников О. В., Шабуня-Клячковская Е. В., Мацукович А. С., Звягин А. И., Винокур Я. А. Размерно-зависимые оптические свойства коллоидных квантовых точек CdS, пассивированных тиогликолевой кислотой. *Физика и техника полупроводников*. 2018;52(9): 1015–1022. <https://doi.org/10.21883/FTP.2018.09.46149.8728>

18. Овчинников О. В., Смирнов М. С., Шапиро Б. И., Шатских Т. С., Латышев А. Н., Mien Ph. Thi Hai, 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>

19. Smirnov M. S., Buganov O. V., Shabunya-Klyachkovskaya E. V., Tikhomirov S. A., Ovchinnikov O. V., Vitukhnovsky A. G., Perepelitsa A. S., Matsukovich A. S., Katsaba A. V. Dynamics of electronic excitations decay in hydrophilic colloidal CdS quantum dots in gelatin with involvement of localized states. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2016;84: 511–518. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.07.004>

20. Кондратенко Т. С., Гревцева И. Г., Звягин А. И., Овчинников О. В., Смирнов М. С. Люминесцентные и нелинейно-оптические свойст-

ва 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>

21. 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_79067971.PDF

Информация об авторах

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>.

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>.

Дерепко 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>.

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>.

Леонова Лиана Юрьевна, к. ф.-м. н., доцент кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: liana.leonova@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4171-4176>.

Перепелица Алексей Сергеевич, к. ф.-м. н., старший преподаватель кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федера-

ция; e-mail: a-perepelitsa@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8097-0688>.

Кондратенко Тамара Сергеевна, к. ф.-м. н., доцент кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tamara-

shatskikh@rambler.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4936-0130>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 25.12.2020; одобрена после рецензирования 15.02.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована онлайн 25.03.2021.