НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2024 Том 24 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2024 Vol. 24 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-406-414
УДК 538.977

Люминесцентные и колориметрические свойства покрытых оболочкой диоксида кремния сферических нанокристаллов теллурида кадмия во внешнем электрическом поле

Даниил Саюзович Дайбаге[1]✉, Сергей Александрович Амброзевич[2], Иван Александрович Захарчук[3], Анна Владимировна Осадченко[4], Александр Сергеевич Селюков[5]

[1,2,3,4,5] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация
[1,2,3,4] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, 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] zakharchukia@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1502-6460
[4] osadchenkoav@student.bmstu.ru, https://orcid.org/0000-0001-9556-4885
[5] selyukov@lebedev.ru, https://orcid.org/0000-0002-4007-6291

Аннотация

Введение. Исследовано поведение оптических и колориметрических свойств покрытых оболочкой диоксида кремния полупроводниковых коллоидных квантовых точек теллурида кадмия ($CdTe/SiO_2$, ядро/оболочка) во внешнем постоянном электрическом поле. Известно, что внешнее электрическое поле приводит в основном к тушению люминесценции квантовых точек и красному смещению спектров люминесценции. Однако в большинстве исследований рассматривается только люминесценция, обусловленная межзонными переходами. В отличие от известных работ в данном исследовании дополнительно рассмотрена люминесценция с участием ловушек в квантовых точках, покрытых оболочкой, и показано влияние на нее внешнего электрического поля. **Метод.** Полупроводниковые нанокристаллы $CdTe/SiO_2$ синтезированы методами коллоидной химии. Готовая смесь представляла собой раствор квантовых точек в водной среде. Для исследования оптических свойств наночастиц $CdTe/SiO_2$ во внешнем постоянном электрическом поле изготовлена серия образцов на основе оптически пассивной целлюлозной пленки, в поры которой были внедрены квантовые точки. Готовый образец представлял собой помещенную между двумя стеклами с прозрачными электродами на основе оксида индия-олова целлюлозную пленку с квантовыми точками. Напряженность постоянного электрического поля, прикладываемого к таким структурам, составила 140 кВ/см. Спектры фотолюминесценции исследуемых наноструктур регистрировались с помощью волоконного ПЗС-спектрометра. **Основные результаты.** Обнаружено, что увеличение внешнего электрического поля приводит к тушению интенсивности люминесценции, обусловленной как межзонными переходами, так и переходами с участием ловушек. Показано, что при значении напряженности поля 60 кВ/см происходит небольшое увеличение интегральной интенсивности фотолюминесценции. Установлена стабильность колориметрических характеристик сферических наночастиц во внешнем электрическом поле. **Обсуждение.** Снижение интенсивности свечения квантовых точек во всем спектре объясняется уменьшением интеграла перекрытия между волновыми функциями электрона и дырки под действием электрического поля. В свою очередь, наличие в зависимости интегральной интенсивности люминесценции от величины внешнего электрического поля локального максимума может быть связано с блокировкой процессов захвата ловушками носителей заряда. Продемонстрированное тушение интенсивности люминесценции также согласуется с результатами подобных работ, показавших снижение поглощения квантовых точек во внешних электрических полях. Результаты работы могут быть использованы при создании оптоэлектронных устройств на основе наночастиц $CdTe/SiO_2$.

Ключевые слова

фотолюминесценция, теллурид кадмия, диоксид кремния, квантовые точки, электрическое поле, колориметрия

© Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Захарчук И.А., Осадченко А.В., Селюков А.С., 2024

Благодарности
Авторы выражают благодарность декану Физического факультета Воронежского государственного университета О.В. Овчинникову, а также профессору кафедры Оптики и спектроскопии Воронежского государственного университета М.С. Смирнову за предоставленные коллоидные наночастицы.

Ссылка для цитирования: Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Захарчук И.А., Осадченко А.В., Селюков А.С. Люминесцентные и колориметрические свойства покрытых оболочкой диоксида кремния сферических нанокристаллов теллурида кадмия во внешнем электрическом поле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 406–414. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-406-414

Luminescent and colorimetric properties of silica-coated spherical cadmium telluride nanocrystals in an external electric field

Daniil S. Daibagya[1]✉, Sergey A. Ambrozevich[2], Ivan A. Zakharchuk[3], Anna V. Osadchenko[4], Alexandr S. Selyukov[5]

[1,2,3,4,5] Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation
[1,2,3,4] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, 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] zakharchukia@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1502-6460
[4] osadchenkoav@student.bmstu.ru, https://orcid.org/0000-0001-9556-4885
[5] selyukov@lebedev.ru, https://orcid.org/0000-0002-4007-6291

Abstract
The study concerns the behavior of optical and colorimetric properties of cadmium telluride semiconductor colloidal quantum dots covered with silica shell ($CdTe/SiO_2$, core/shell) in an external constant electric field has been studied. To date, the electric field is known to lead mainly to quenching and red shift of the luminescence spectra of quantum dots; however, in most of the corresponding studies only the behavior of band-edge luminescence is considered. In this work, in addition to the luminescence due to interband transitions, the effect of the electric field on the trap-related luminescences of core/shell quantum dots is studied. Semiconductor nanocrystals were synthesized by colloidal chemistry methods. The product mixture was a solution of quantum dots in an aqueous medium. To investigate the optical properties of $CdTe/SiO_2$ nanoparticles in an external electric field, a series of samples was fabricated on the basis of an optically passive cellulose film, in the pores of which quantum dots were embedded. The final sample was a cellulose film with quantum dots sandwiched between two glasses with transparent indium tin oxide electrodes. The strength of the constant electric field applied to such structures reached 140 kV/cm. Photoluminescence spectra of the investigated nanostructures were recorded using a CCD spectrometer. As a result of the experiments it was found that the presence and subsequent increase of the external electric field leads to quenching of the intensity of both band-edge and trap-related photoluminescence of quantum dots. This fact is associated with a decrease in the overlap between electron and hole wave functions under the action of the electric field. It is also shown that at moderate field strength there is a slight increase in the total photoluminescence intensity. This observation can be related to impeded charge carrier trapping. The demonstrated quenching of luminescence intensity is also consistent with the results of other authors who have shown a decrease in the absorption of quantum dots in external electric fields. The stability of colorimetric characteristics of the spherical nanoparticles in an external electric field has been demonstrated. The results of the study can be used for development of optoelectronic devices based on $CdTe/SiO_2$ nanoparticles.

Keywords
photoluminescence, cadmium telluride, silicon dioxide, quantum dots, electric field, colorimetry

Acknowledgements
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 providing the nanostructures.

For citation: Daibagya D.S., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S. Luminescent and colorimetric properties of silica-coated spherical cadmium telluride nanocrystals in an external electric field. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 406–414 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-406-414

Введение

С момента своего первого успешного синтеза коллоидные нанокристаллы [1, 2] и, в частности, сферические наночастицы (или квантовые точки (КТ)) [3–8] вызывают постоянный интерес благодаря своим исключительным оптическим и нелинейным свойствам, а также химической стабильности [9–13]. Дальнейшие успехи в коллоидной химии привели к появлению частиц с различной морфологией: наностержни [14], нанопластины [15, 16], которые могут сворачиваться в наносвитки [17–20]. Наряду с органическими и металлоорганическими люминофорами [21–25], коллоидные нанокристаллы часто используются в светодиодах [26–28], лазерах [29, 30] и фотодетекторах [31]. Интерес к полупроводниковым коллоидным наночастицам также вызван возможностью управления их люминесцентными и, как следствие, колориметрическими свойствами с помощью варьирования среднего размера частиц во время синтеза [32], а также узкими линиями излучения

и высоким квантовым выходом их люминесценции. Квантовый выход коллоидных нанокристаллов, покрытых внешней оболочкой из полупроводникового материала, может достигать 85–95 % [33]. Покрытие оболочкой коллоидных наночастиц способствует увеличению фотостабильности и увеличению квантового выхода за счет эффективной локализации экситона на определенном расстоянии от поверхности нанокристалла [34, 35]. Однако оболочка не всегда позволяет полностью избавиться от различных негативных эффектов в нанокристаллах. Одним из таких эффектов может быть фотодеградация люминесценции коллоидных наночастиц [36]. Также существуют внешние факторы, которые могу влиять на фотолюминесценцию коллоидных нанокристаллов, такие как температура и электрическое поле. Уменьшение (повышение) температуры может привести к синему (красному) смещению спектров фотолюминесценции [37, 38], а внешнее электрическое поле — как к тушению [39, 40], так и к усилению [41, 42] интенсивности фотолюминесценции. Такое поведение фотолюминесценции может быть использовано в качестве инструмента для управления излучением и разработки новых функциональных устройств. Таким образом, исследование поведения люминесценции коллоидных нанокристаллов при внешних воздействиях является перспективным направлением, поскольку понимание физических процессов, протекающих в них, способствует повышению эффективности оптоэлектронных устройств на основе полупроводниковых наночастиц. Цель настоящей работы — исследовать оптические и колориметрические свойства КТ покрытых оболочкой диоксида кремния полупроводниковых коллоидных квантовых точек теллурида кадмия (CdTe/SiO_2, ядро/оболочка) во внешнем электрическом поле и проанализировать его влияние на колориметрические характеристики КТ.

Техника эксперимента

Полупроводниковые КТ CdTe/SiO_2 были синтезированы методами коллоидной химии следующим образом. В качестве источника кадмия и органического лиганда выступали бромид кадмия ($CdBr_2$) и 3-меркаптопропионовая кислота (3-MPA). В 50 мл воды растворяли 1 ммоль $CdBr_2$ и 2,7 ммоль 3-MPA при постоянном перемешивании магнитной мешалкой с частотой 250 мин$^{-1}$ в реакционной колбе при комнатной температуре. Водородный показатель доводился до pH = 10. В результате получался раствор прекурсора кадмия (Cd/3-MPA). Для получения раствора прекурсора теллура 0,25 ммоль порошка оксида теллура (TeO_3) насыпали в термостатируемую стеклянную колбу, в которой находилось 25 мл воды, и перемешивали с помощью магнитной мешалки. Затем в колбу с TeO_3 добавляли порошок борогидрида натрия ($NaBH_4$) в избытке до тех пор, пока цвет получившегося раствора не приобретал прозрачно-розовый оттенок. После этого раствор прекурсора теллура добавляли в раствор Cd/3-MPA. Полученные КТ осаждали ацетоном и центрифугировали для удаления растворимых продуктов реакции и не провзаимодействовавших прекурсоров. Полученный осадок повторно растворяли в воде. Очистку повторяли три раза. Формирование оболочки SiO_2 на интерфейсе КТ CdTe осуществляли в рамках водного синтеза. Процедура основана на внесении в коллоидный раствор КТ CdTe 1 ммоль 3-меркаптопропил-триметоксисилана, который заменял лиганд 3-MPA и позволял в дальнейшем увеличить толщину оболочки SiO_2 при внесении в коллоидный раствор порции 50 ммоль метасиликата натрия. Внедрение коллоидных КТ CdTe/SiO_2 в целлюлозную матрицу происходило путем выдерживания в течение двух дней в темном помещении раствора КТ в объеме 10 мл, в который помещали пористую мембрану, изготовленную из регенерированной целлюлозы с размером пор порядка 4 нм.

Распределение КТ по размерам определялось с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Использовался микроскоп JEOL JEM-2100 с ускоряющим напряжением 200 кВ.

Спектр пропускания водного раствора КТ CdTe/SiO_2 регистрировался с помощью спектрофотометра Specord M40 в диапазоне областей длин волн 200–900 нм. Для этого раствор нанокристаллов объемом 100 мкл в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 см разбавлялся 1600 мкл дистиллированной воды.

Образцы для исследования спектральных характеристик коллоидных сферических наночастиц CdTe/SiO_2 во внешнем электрическом поле изготовлены в соответствии с технологией, описанной в работе [43]. На первую стеклянную подложку с проводящими электродами из оксида индия и оксида олова методом центрифугирования наносилась диэлектрическая пленка из смеси клея B7000 с толуолом в соотношении 1:2. Вторая стеклянная подложка аналогичным образом покрывалась пленкой из смеси полистирола (0,09 г) и толуола (1000 мкл). Между двумя стеклами помещались КТ CdTe/SiO_2 в целлюлозной матрице. При этом электроды располагались внутри структуры. На электропроводящий клей приклеивались контакты в виде медных проволочек. Толщина активного слоя (пленка из клея–CdTe/SiO_2–пленка из полистирола) составила 25 мкм.

Спектры фотолюминесценции регистрировались с помощью ПЗС-спектрометра Ocean Optics Maya 2000Pro при комнатной температуре. В качестве источника возбуждения использовался импульсный лазер PicoQuant LDH-C 400 (длина волны излучения 405 нм; частота повторения 40 МГц; длительность импульса 75 пс; средняя мощность излучения 5 мВт). Образец был подключен к источнику постоянного напряжения TESLA TV-2 с диапазоном рабочего напряжения 0–1500 В.

Результаты

В результате эксперимента выявлено, что в спектре пропускания коллоидных КТ CdTe/SiO_2 (рис. 1) присутствует слабовыраженный минимум (456 нм), который обусловлен электронными переходами между валентной зоной и зоной проводимости. С помощью зависимости, представленной в работе [44], рассчитан средний радиус исследуемых коллоидных нанокристаллов — 1,76 нм, что коррелирует с результатами анализа ПЭМ-

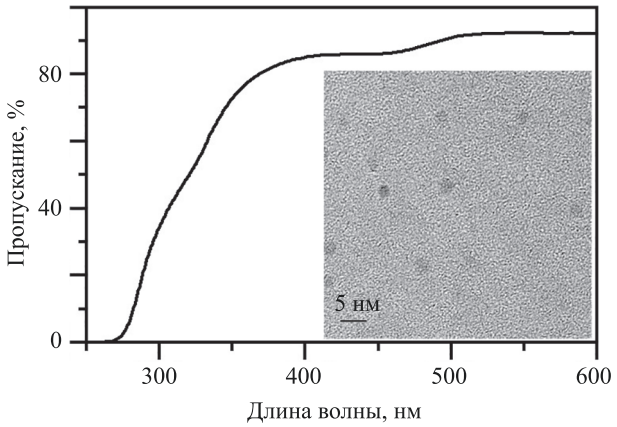

Рис. 1. Спектр пропускания и ПЭМ-изображение (вставка) квантовых точек CdTe/SiO_2

Fig. 1. Transmittance spectrum and TEM-image (inset) of CdTe/SiO_2 quantum dots

изображения (вставка на рис. 1). Край пропускания исследуемых КТ смещен в коротковолновую область спектра относительно края пропускания объемного CdTe, что обусловлено квантово-размерным эффектом [44].

В спектре фотолюминесценции КТ CdTe/SiO_2 (рис. 2) наблюдается полоса с максимумом на длине волны 520 нм и шириной на полувысоте 54 нм, обусловленная межзонными переходами из зоны проводимости в валентную зону. В длинноволновой области наблюдается небольшое уширение спектра фотолюминесценции КТ, которое обусловлено слабой люминесценцией дефектных состояний. Основная часть спектра фотолюминесценции находится в видимом диапазоне, что позволяет рассчитать колориметрические характеристики исследуемых КТ.

Наличие внешнего электрического поля привело к уменьшению интенсивности люминесценции (тушение фотолюминесценции). Дальнейшее увеличение напряженности электрического поля также способствует уменьшению интенсивности люминесценции, обусловленной как межзонными переходами, так и переходами с участием ловушек. Стоит также отметить, что вопреки ожидаемому красному смещению спектров фотолюминесценции из-за эффекта Штарка [40], никаких изменений, кроме тушения интенсивности фотолюминесценции под воздействием внешнего электрического поля, не обнаружено. Отсутствие красного смещения спектров фотолюминесценции исследуемых КТ CdTe/SiO_2 обусловлено тем, что положение пика фотолюминесценции, вызванное межзонными переходами, в рассматриваемом случае нечувствительно к электрическому полю. Это связано с тем, что для КТ малого радиуса изменение штарковского сдвига в зависимости от напряженности поля менее выражено, чем в КТ большего радиуса, из-за сильного пространственного ограничения носителей заряда [45]. Для количественной оценки наблюдаемого тушения интенсивности фотолюминесценции была рассчитана интегральная интенсивность спектра фотолюминесценции (рис. 2, вставка). При увеличении напряженности электрического поля от 0 до 140 кВ/см интенсивность фотолюминесценции исследуемых КТ падает на 22 %. При значении напряженности внешнего электрического поля 60 кВ/см наблюдается небольшое увеличение интенсивности фотолюминесценции. Это может быть связано с блокировкой процессов захвата носителей заряда ловушками [46, 47]. Если сообщаемая захваченным ловушками носителям заряда электрическим полем энергия достаточно велика, то может произойти освобождение носителей заряда, у которых достаточно низкая энергия активации. Этот механизм может обеспечить наблюдаемое увеличение интегральной интенсивности. При значении напряженности внешнего электрического поля 150 кВ/см происходил электрических пробой образца.

На основе полученных спектров фотолюминесценции были определены колориметрические характеристики излучения КТ CdTe/SiO_2. Цветовые координаты, коррелированная цветовая температура (T_c), доминирующая длина волны и чистота цвета (*CP*) рассчитаны по методике, описанной в работах [48–50], с использованием источника белого света D65. Из рис. 3 видно, что при увеличении напряженности внешнего электрического поля цветовые координаты практически не изменяются и, как следствие, остаются постоянными доминирующая длина волны, *CP* и T_c (таблица). Значения колориметрических параметров, соответствующие промежуточным электрическим полям, находятся в диапазоне между значениями, которые соответствуют 0 и 140 кВ/см, и практически не отличаются между собой, поэтому на хроматической диаграмме они не представлены.

Постоянство колориметрических характеристик КТ CdTe/SiO_2 при наличии электрического поля, а также достаточно высокая чистота цвета фотолюминесценции свидетельствуют о потенциальной возможности

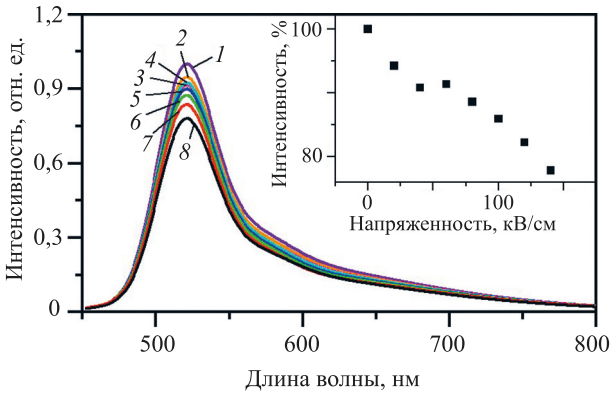

Рис. 2. Спектры фотолюминесценции квантовых точек CdTe/SiO_2 при значениях напряженности внешнего электрического поля: 0 (кривая *1*), 20 (кривая *2*), 40 (кривая *3*), 60 (кривая *4*), 80 (кривая *5*), 100 (кривая *6*), 120 (кривая *7*) и 140 кВ/см (кривая *8*) и зависимость интегральной интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов CdTe/SiO_2 от внешнего электрического поля (вставка)

Fig. 2. Photoluminescence spectra of CdTe/SiO_2 QDs in external electric field with amplitudes of 0 (curve *1*), 20 (curve *2*), 40 (curve *3*), 60 (curve *4*), 80 (curve *5*), 100 (curve *6*), 120 (curve *7*) and 140 kV/cm (curve *8*) and the electric field dependence of the total photoluminescence intensity of CdTe/SiO_2 nanocrystals (inset)

Таблица. Колориметрические характеристики фотолюминесценции квантовых точек $CdTe/SiO_2$ при различных значениях внешнего электрического поля

Table. Colorimetric characteristics of photoluminescence of $CdTe/SiO_2$ QDs at different values of the external electric field

Напряженность электрического поля, кВ/см	Цветовые координаты		Доминирующая длина волны λ*, нм	Чистота света *CP*, %	Цветовая температура T_c, К
	x	*y*			
0	0,3094	0,5919	551	73,51	5912
140	0,3019	0,5917	549	71,60	6046

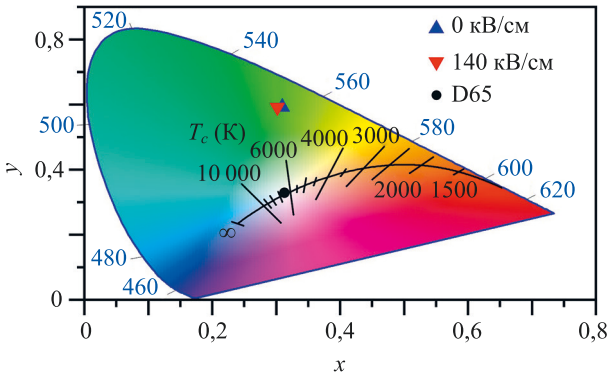

Рис. 3. Хроматическая диаграмма: сплошная линия — линия цветности абсолютно черного тела (кривая Планка); T_c, К — коррелированная цветовая температура; D65 — стандартное излучение

Fig. 3. Chromaticity diagram: solid line is chromaticity line of a black-body radiator (Planck curve); T_c, K is the correlated color temperature; D65 is the standard illuminant

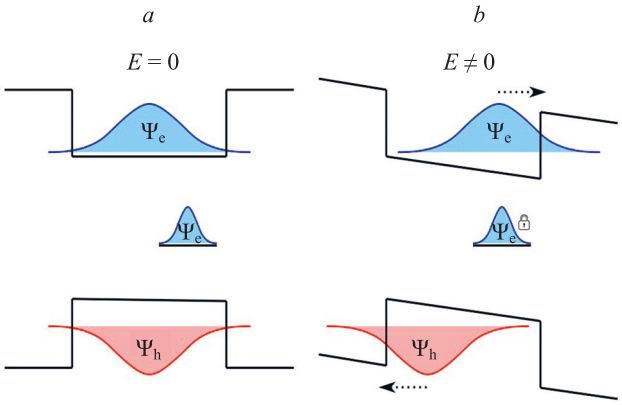

Рис. 4. Локализация носителей заряда в квантовой точке в отсутствии (*a*) и присутствии (*b*) внешнего электрического поля (*E*); Ψ_e — волновая функция электрона (синяя кривая); Ψ_h — волновая функция дырки (красная кривая). Между валентной зоной (снизу) и зоной проводимости (сверху) находится ловушка с захваченным электроном

Fig. 4. Localization of charge carriers in a quantum dot in the absence (*a*) and presence (*b*) of an external electric field (*E*); Ψ_e is the wave function of an electron (blue curve); Ψ_h is the wave function of a hole (red curve). Between the valence zone (bottom) and the conduction zone (top) is a trap with a trapped electron

использования данных нанокристаллов в светодиодах в качестве материала излучающего слоя.

Обсуждение

Обсудим механизм тушения интенсивности фотолюминесценции коллоидных полупроводниковых сферических нанокристаллов $CdTe/SiO_2$, внедренных в целлюлозную матрицу, под действием внешнего электрического поля. Рассмотрим сначала случай фотолюминесценции, обусловленной межзонными переходами. Электрон двигается против направления поля, а дырка — по направлению поля. Следовательно, электрон локализуется около одной стенки КТ, а дырка возле другой (рис. 4). При этом стенки КТ препятствуют диссоциации экситона под действием электрического поля, так как носители заряда в электронно-дырочной паре все еще находятся на близком расстоянии, меньшем боровского радиуса. Локализация у противоположных стенок КТ электрона и дырки приводит к уменьшению интеграла перекрытия между волновыми функциями электрона Ψ_e и дырки Ψ_h, что, в свою очередь, уменьшает вероятность излучательной рекомбинации экситона [51, 52]. Аналогичным образом объясняется тушение интенсивности фотолюминесценции с участием ловушек. Во внешнем электрическом поле захваченные ловушками электроны Ψ_e не двигаются, а дырки Ψ_h перемещаются по направлению поля. Это аналогично приводит к уменьшению интеграла перекрытия между волновыми функция электрона Ψ_e и дырки Ψ_h. Продемонстрированное тушение интенсивности люминесценции также согласуется и с результатами подобных исследований, показавших снижение поглощения КТ во внешних электрических полях [53].

Заключение

В работе показано, что на поведение фотолюминесценции, обусловленной межзонными переходами и переходами с участием ловушек, во внешнем электрическом поле оказывают влияние два фактора. Первый фактор — тушение интенсивности люминесценции квантовых точек (примерно на 22 %) за счет уменьшения интеграла перекрытия между волновыми функциями электрона и дырки под воздействием электрического поля. Второй фактор — блокировка процессов захвата ловушками носителей заряда, которая приводит к незначительному увеличению интегральной интенсивности фотолюминесценции, наблюдаемому при 60 кВ/см. Показано, что колориметрические характеристики квантовых точек практически не изменяются во внешнем электрическом поле, что может быть перспективно для создания излучающих устройств со стабильной цветопередачей на основе исследуемых структур.

Литература

1. Ващенко А.А., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Селюков А.С., Васильев Р.Б., Соколикова 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
2. Korolev N.V., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Shatskikh T.S. Energy structure and absorption spectra of colloidal CdS nanocrystals in gelatin matrix // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2015. V. 68. P. 159–163. https://doi.org/10.1016/j.physe.2014.10.042
3. Андрюшкин В.В., Драгунова А.С., Комаров С.Д., Надточий А.М., Гладышев А.Г., Бабичев А.В., Уваров А.В., Новиков И.И., Колодезный Е.С., Карачинский Л.Я., Крыжановская Н.В, Неведомский В.Н., Егоров А.Ю., Бугров В.Е. Влияние низких температур и термического отжига на оптические свойства квантовых точек InGaPAs // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 5. С. 921–928. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-5-921-928
4. 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. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1098-1103
5. Овчинников О.В., Смирнов М.С., Шапиро Б.И., Шатских Т.С., Латышев А.Н., Хай М.Ф.Т., Хохлов В.Ю. Спектральные проявления гибридной ассоциации коллоидных квантовых точек CdS с молекулами метиленового голубого // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 3. С. 389–397. https://doi.org/10.7868/S0030403413090195
6. Ahmad A.K., Mohammed A.H., Skaptsov A.A. Luminescence technique for studying the growth of $AgInS_2$ quantum dots // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 6. С. 1078–1084. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1078-1084
7. Ganeev R.A., Boltaev G.S., Kim V.V., Zhang K., Zvyagin A.I., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Redkin P.V., Wöstmann M., Zacharias H., Guo C. Effective high-order harmonic generation from metal sulfide quantum dots // Optics Express. 2018. V. 26. N 26. P. 35013–35025. https://doi.org/10.1364/OE.26.035013
8. 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
9. 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. Т. 124. № 5. С. 640–647. https://doi.org/10.21883/OS.2018.05.45945.310-17
10. Norris D.J., Bawendi M.G. Measurement and assignment of the size-dependent optical spectrum in CdSe quantum dots // Physical Review B. 1996. V. 53. N 24. P. 16338–16346. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.16338
11. Alivisatos A.P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots // Science. 1996. V. 271. N 5251. P. 933–937. https://doi.org/10.1126/science.271.5251.933
12. Burda C., Chen X., Narayanan R., El-Sayed M.A. Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes // Chemical Reviews. 2005. V. 105. N 4. P. 1025–1102. https://doi.org/10.1021/cr030063a
13. Ganeev R.A., Zvyagin A.I., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S. Peculiarities of the nonlinear optical absorption of Methylene blue and Thionine in different solvents // Dyes and Pigments. 2018. V. 149. P. 236–241. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.09.063
14. Manna L., Scher E.C., Alivisatos A.P. Synthesis of soluble and processable rod-, arrow-, teardrop-, and tetrapod-shaped CdSe nanocrystals // Journal of the American Chemical Society. 2000. V. 122. N 51. P. 12700–12706. https://doi.org/10.1021/ja003055
15. Ithurria S., Dubertret B. Quasi 2D colloidal CdSe platelets with thicknesses controlled at the atomic level // Journal of the American Chemical Society. 2008. V. 130. N 49. P. 16504–16505. https://doi.org/10.1021/ja807724e

References

1. 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
2. Korolev N.V., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Shatskikh T.S. Energy structure and absorption spectra of colloidal CdS nanocrystals in gelatin matrix. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2015, vol. 68, pp. 159–163. https://doi.org/10.1016/j.physe.2014.10.042
3. Andryushkin V.V., Dragunova A.S., Komarov S.D., Nadtochiy A.M., Gladyshev A.G., Babichev A.V., Uvarov A.V., Novikov I.I., Kolodeznyi E.S., Karachinsky L.Ya., Kryzhanovskaya N.V., Nevedomskii V.N., Egorov A.Yu., Bougrov V.E. Influence of low temperatures and thermal annealing on the optical properties of InGaPAs quantum dots. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 921–928. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-5-921-928
4. 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). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1098-1103
5. Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Shatskikh T.S., Latyshev A.N., Khokhlov V.Y., Shapiro B.I., Mien P.T.H. Spectral manifestations of hybrid association of cds colloidal quantum dots with methylene blue molecules. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 115, no. 3, pp. 340–348. https://doi.org/10.1134/S0030400X1309018X
6. Ahmad A.K., Mohammed A.H., Skaptsov A.A. Luminescence technique for studying the growth of $AgInS_2$ quantum dots. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1078–1084. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1078-1084
7. Ganeev R.A., Boltaev G.S., Kim V.V., Zhang K., Zvyagin A.I., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Redkin P.V., Wöstmann M., Zacharias H., Guo C. Effective high-order harmonic generation from metal sulfide quantum dots. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 26, pp. 35013–35025. https://doi.org/10.1364/OE.26.035013
8. 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
9. Kondratenko T.S., Grevtseva I.G., Zvyagin A.I., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S. Luminescence and nonlinear optical properties of hybrid associates of Ag_2S quantum dots with molecules of thiazine dyes. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124, no. 5, pp. 673–680. https://doi.org/10.1134/S0030400X18050090
10. Norris D.J., Bawendi M.G. Measurement and assignment of the size-dependent optical spectrum in CdSe quantum dots. *Physical Review B*, 1996, vol. 53, no. 24, pp. 16338–16346. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.16338
11. Alivisatos A.P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *Science*, 1996, vol. 271, no. 5251, pp. 933–937. https://doi.org/10.1126/science.271.5251.933
12. Burda C., Chen X., Narayanan R., El-Sayed M.A. Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes. *Chemical Reviews*, 2005, vol. 105, no. 4, pp. 1025–1102. https://doi.org/10.1021/cr030063a
13. Ganeev R.A., Zvyagin A.I., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S. Peculiarities of the nonlinear optical absorption of Methylene blue and Thionine in different solvents. *Dyes and Pigments*, 2018, vol. 149, pp. 236–241. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.09.063
14. Manna L., Scher E.C., Alivisatos A.P. Synthesis of soluble and processable rod-, arrow-, teardrop-, and tetrapod-shaped CdSe nanocrystals. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, vol. 122, no. 51, pp. 12700–12706. https://doi.org/10.1021/ja003055
15. Ithurria S., Dubertret B. Quasi 2D colloidal CdSe platelets with thicknesses controlled at the atomic level. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, vol. 130, no. 49, pp. 16504–16505. https://doi.org/10.1021/ja807724e

16. Селюков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Ващенко А.А., Васильев Р.Б., Соколикова 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
17. Bouet C., Mahler B., Nadal B., Abecassis B., Tessier M.D., Ithurria S., Xu X., Dubertret B. Two-dimensional growth of CdSe nanocrystals, from nanoplatelets to nanosheets // Chemistry of Materials. 2013. V. 25. N 4. P. 639–645. https://doi.org/10.1021/cm304080q
18. Hutter E.M., Bladt E., Goris B., Pietra F., Van Der Bok J.C., Boneschanscher M.P., de Mello Donegá C., Bals S., Vanmaekelbergh D. Conformal and atomic characterization of ultrathin CdSe platelets with a helical shape // Nano Letters. 2014. V. 14. N 11. P. 6257–6262. https://doi.org/10.1021/nl5025744
19. Daibagya D.S., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., Ambrozevich S.A., Skorikov M.L., Vasiliev R.B. Luminescence and colorimetric properties of ultrathin cadmium selenide nanoscrolls // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2023. V. 50. N 11. P. 510–514. https://doi.org/10.3103/S1068335623110118
20. Васильев Р.Б., Соколикова М.С., Витухновский А.Г., Амброзевич С.А., Селюков А.С., Лебедев В.С. Оптика свёрнутых в виде свитков коллоидных квантоворазмерных наноструктур CdSe // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 9. С. 853–857.
21. Corrêa Santos D., Vieira Marques M.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
22. Vashchenko A.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Daibagya D.S., Shliakhtun O., Volodin N.Yu., Cheptsov D.A., Dolotov S.M., Traven V.F. Electroluminescence of coumarin-based dyes // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2022. V. 49. N 3. P. 74–77. https://doi.org/10.3103/S106833562203006X
23. 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
24. Ho C.-L., Li H., Wong W.-Y. Red to near-infrared organometallic phosphorescent dyes for OLED applications // Journal of Organometallic Chemistry. 2014. V. 751. P. 261–285. https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2013.09.035
25. Осадченко А.В., Ващенко А.А., Захарчук И.А., Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Володин Н.Ю., Чепцов Д.А., Долотов С.М., Травень В.Ф., Авраменко А.И., Семенова С.Л., Селюков А.С. Органические светоизлучающие диоды с новыми красителями на основе кумарина // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 6. С. 1112–1118. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118
26. Chen Z., Nadal B., Mahler B., Aubin H., Dubertret B. Quasi-2D colloidal semiconductor nanoplatelets for narrow electroluminescence // Advanced Functional Materials. 2014. V. 24. N 3. P. 295–302. https://doi.org/10.1002/adfm.201301711
27. Vitukhnovsky A.G., Lebedev V.S., Selyukov A.S., Vashchenko A.A., Vasiliev R.B., Sokolikova M.S. Electroluminescence from colloidal semiconductor CdSe nanoplatelets in hybrid organic–inorganic light emitting diode // Chemical Physics Letters. 2015. V. 619. P. 185–188. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2014.12.002
28. Fan F., Kanjanaboos P., Saravanapavanantham M., Beauregard E., Ingram G., Yassitepe E., Adachi M., Voznyy O., Johnston A., Walters G., Kim G., Lu Z., Sargent E.H. Colloidal CdSe1–xSx nanoplatelets with narrow and continuously-tunable electroluminescence // Nano Letters. 2015. V. 15. N 7. P. 4611–4615. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01233
29. Grim J.Q., Christodoulou S., Di Stasio F., Krahne R., Cingolani R., Manna L., Moreels I. Continuous-wave biexciton lasing at room temperature using solution-processed quantum wells // Nature Nanotechnology. 2014. V. 9. N 11. P. 891–895. https://doi.org/10.1038/nnano.2014.213
30. Guzelturk B., Kelestemur Y., Olutas M., Delikanli S., Demir H.V. Amplified spontaneous emission and lasing in colloidal nanoplatelets // ACS Nano. 2014. V. 8. N 7. P. 6599–6605. https://doi.org/10.1021/nn5022296
31. Lhuillier E., Dayen J.F., Thomas D.O., Robin A., Doudin B., Dubertret B. Nanoplatelets bridging a nanotrench: a new architecture

16. 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
17. Bouet C., Mahler B., Nadal B., Abecassis B., Tessier M.D., Ithurria S., Xu X., Dubertret B. Two-dimensional growth of CdSe nanocrystals, from nanoplatelets to nanosheets. *Chemistry of Materials*, 2013, vol. 25, no. 4, pp. 639–645. https://doi.org/10.1021/cm304080q
18. Hutter E.M., Bladt E., Goris B., Pietra F., Van Der Bok J.C., Boneschanscher M.P., de Mello Donegá C., Bals S., Vanmaekelbergh D. Conformal and atomic characterization of ultrathin CdSe platelets with a helical shape. *Nano Letters*, 2014, vol. 14, no. 11, pp. 6257–6262. https://doi.org/10.1021/nl5025744
19. Daibagya D.S., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., Ambrozevich S.A., Skorikov M.L., Vasiliev R.B. Luminescence and colorimetric properties of ultrathin cadmium selenide nanoscrolls. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, no. 11, pp. 510–514. https://doi.org/10.3103/S1068335623110118
20. Vasiliev R.B., Sokolikova M.S., Vitukhnovskii A.G., Ambrozevich S.A., Selyukov A.S., Lebedev V.S. Optics of colloidal quantum-confined CdSe quantum nanoscrolls. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 9, pp. 853–857. https://doi.org/10.1070/QE2015v045n09ABEH015827
21. Corrêa Santos D., Vieira Marques M.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
22. Vashchenko A.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Daibagya D.S., Shliakhtun O., Volodin N.Yu., 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
23. 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
24. Ho C.-L., Li H., Wong W.-Y. Red to near-infrared organometallic phosphorescent dyes for OLED applications. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2014, vol. 751, pp. 261–285. https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2013.09.035
25. Osadchenko A.V., Vashchenko A.A., Zakharchuk I.A., Daibagya D.S., Ambrozevich S.A., Volodin N.Yu., Cheptsov D.A., Dolotov S.M., Traven V.F., Avramenko A.I., Semenova S.L., Selyukov A.S. Organic light-emitting diodes with new dyes based on coumarin. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1112–1118. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118
26. Chen Z., Nadal B., Mahler B., Aubin H., Dubertret B. Quasi-2D colloidal semiconductor nanoplatelets for narrow electroluminescence. *Advanced Functional Materials*. 2014, vol. 24, no. 3, pp. 295–302. https://doi.org/10.1002/adfm.201301711
27. Vitukhnovsky A.G., Lebedev V.S., Selyukov A.S., Vashchenko A.A., Vasiliev R.B., Sokolikova M.S. Electroluminescence from colloidal semiconductor CdSe nanoplatelets in hybrid organic–inorganic light emitting diode. *Chemical Physics Letters*, 2015, vol. 619, pp. 185–188. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2014.12.002
28. Fan F., Kanjanaboos P., Saravanapavanantham M., Beauregard E., Ingram G., Yassitepe E., Adachi M., Voznyy O., Johnston A., Walters G., Kim G., Lu Z., Sargent E.H. Colloidal CdSe1–xSx nanoplatelets with narrow and continuously-tunable electroluminescence. *Nano Letters*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 4611–4615. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01233
29. Grim J.Q., Christodoulou S., Di Stasio F., Krahne R., Cingolani R., Manna L., Moreels I. Continuous-wave biexciton lasing at room temperature using solution-processed quantum wells. *Nature Nanotechnology*, 2014, vol. 9, no. 11, pp. 891–895. https://doi.org/10.1038/nnano.2014.213
30. Guzelturk B., Kelestemur Y., Olutas M., Delikanli S., Demir H.V. Amplified spontaneous emission and lasing in colloidal nanoplatelets. *ACS Nano*, 2014, vol. 8, no. 7, pp. 6599–6605. https://doi.org/10.1021/nn5022296
31. Lhuillier E., Dayen J.F., Thomas D.O., Robin A., Doudin B., Dubertret B. Nanoplatelets bridging a nanotrench: a new architecture

for photodetectors with increased sensitivity // Nano Letters. 2015. V. 15. N 3. P. 1736–1742. https://doi.org/10.1021/nl504414g
32. Hohng S., Ha T. Near-complete suppression of quantum dot blinking in ambient conditions // Journal of the American Chemical Society. 2004. V. 126. N 5. P. 1324–1325. https://doi.org/10.1021/ja039686w
33. Shim H.S., Ko M., Nam S., Oh J.H., Jeong S., Yang Y., Park S.M., Do Y.R., Song J.K. InP/ZnSeS/ZnS quantum dots with high quantum yield and color purity for display devices // ACS Applied Nano Materials. 2023. V. 6. N 2. P. 1285–1294. https://doi.org/10.1021/acsanm.2c04936
34. Dabbousi B.O., Rodriguez-Viejo J., Mikulec F.V., Heine J.R., Mattoussi H., Ober R., Jensen K.F., Bawendi M.G. (CdSe)ZnS core–shell quantum dots: synthesis and characterization of a size series of highly luminescent nanocrystallites // The Journal of Physical Chemistry B. 1997. V. 101. N 46. P. 9463–9475. https://doi.org/10.1021/jp971091y
35. Ovchinnikov O., Aslanov S., Smirnov M., Perepelitsa A., Kondratenko T., Selyukov A., Grevtseva I. Colloidal Ag_2S/SiO_2 core/shell quantum dots with IR luminescence // Optical Materials Express. 2021. V. 11. N 1. P. 89–104. https://doi.org/10.1364/OME.411432
36. Malashin I.P., Daibagya D.S., Tynchenko V.S., Nelyub V.A., Borodulin A.S., Gantimurov A.P., Ambrozevich S.A., Selyukov A.S. ML-based forecasting of temporal dynamics in luminescence spectra of Ag_2S colloidal quantum dots // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 53320−53334. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3387024
37. Achtstein A.W., Schliwa A., Prudnikau A., Hardzei M., Artemyev M.V., Thomsen C., Woggon U. Electronic structure and exciton–phonon interaction in two-dimensional colloidal CdSe nanosheets // Nano Letters. 2012. V. 12. N 6. P. 3151–3157. https://doi.org/10.1021/nl301071n
38. Wuister S.F., de Mello Donegá C., Meijerink A. Luminescence temperature antiquenching of water-soluble CdTe quantum dots: role of the solvent // Journal of the American Chemical Society. 2004. V. 126. N 33. P. 10397–10402. https://doi.org/10.1021/ja048222a
39. 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
40. Гуринович Л.И., Лютич А.А., Ступак А.П., Прислопский С.Я., Русаков Е.К., Артемьев М.В., Гапоненко С.В., Демир Х.В. Люминесценция квантово-размерных нанокристаллов и наностержней селенида кадмия во внешнем электрическом поле // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. № 8. С. 1045−1053.
41. Wang Z., Huang Z., Liu G., Cai B., Zhang S., Wang Y. In-situ and reversible enhancement of photoluminescence from $CsPbBr_3$ nanoplatelets by electrical bias // Advanced Optical Materials. 2021. V. 9. N 15. P. 2100346. https://doi.org/10.1002/adom.202100346
42. Гуляев Д.В., Журавлев К.С. Механизм воздействия электрического поля поверхностной акустической волны на кинетику низкотемпературной фотолюминесценции сверхрешеток второго рода GaAs/AlAs // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. № 2. С. 211−216.
43. Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Перепелица А.С., Захарчук И.А., Сминов М.С., Овчинников О.В., Асланов С.В., Осадченко А.В., Селюков А.С. Влияние электрического поля на рекомбинационную люминесценцию коллоидных квантовых точек сульфида серебра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2023. № 3(108). С. 100–117. https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-3-100-117
44. Badawi A., Al-Hosiny N., Abdallah S., Negm S., Talaat H. Tuning photocurrent response through size control of CdTe quantum dots sensitized solar cells // Solar Energy. 2013. V. 88. P. 137−143. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.005
45. Wu S., Xia W. Exciton polarizability and absorption spectra in CdSe/ZnS nanocrystal quantum dots in electric fields // Journal of Applied Physics. 2013. V. 114. N 4. P. 043709. https://doi.org/10.1063/1.4816559
46. Rabouw F.T., Van Der Bok J.C., Spinicelli P., Mahler B., Nasilowski M., Pedetti S., Dubertret B., Vanmaekelbergh D. Temporary charge carrier separation dominates the photoluminescence decay dynamics of colloidal CdSe nanoplatelets // Nano Letters. 2016. V. 16. N 3. P. 2047−2053. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00053
47. Rabouw F.T., Kamp M., van Dijk-Moes R.J., Gamelin D.R., Koenderink A.F., Meijerink A., Vanmaekelbergh D. Delayed exciton emission and its relation to blinking in CdSe quantum dots // Nano

for photodetectors with increased sensitivity. *Nano Letters*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 1736–1742. https://doi.org/10.1021/nl504414g
32. Hohng S., Ha T. Near-complete suppression of quantum dot blinking in ambient conditions. *Journal of the American Chemical Society*, 2004, vol. 126, no. 5, pp. 1324–1325. https://doi.org/10.1021/ja039686w
33. Shim H.S., Ko M., Nam S., Oh J.H., Jeong S., Yang Y., Park S.M., Do Y.R., Song J.K. InP/ZnSeS/ZnS quantum dots with high quantum yield and color purity for display devices. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 1285–1294. https://doi.org/10.1021/acsanm.2c04936
34. Dabbousi B.O., Rodriguez-Viejo J., Mikulec F.V., Heine J.R., Mattoussi H., Ober R., Jensen K.F., Bawendi M.G. (CdSe)ZnS core–shell quantum dots: synthesis and characterization of a size series of highly luminescent nanocrystallites. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, vol. 101, no. 46, pp. 9463–9475. https://doi.org/10.1021/jp971091y
35. Ovchinnikov O., Aslanov S., Smirnov M., Perepelitsa A., Kondratenko T., Selyukov A., Grevtseva I. Colloidal Ag_2S/SiO_2 core/shell quantum dots with IR luminescence. *Optical Materials Express*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 89–104. https://doi.org/10.1364/OME.411432
36. Malashin I.P., Daibagya D.S., Tynchenko V.S., Nelyub V.A., Borodulin A.S., Gantimurov A.P., Ambrozevich S.A., Selyukov A.S. ML-based forecasting of temporal dynamics in luminescence spectra of Ag_2S colloidal quantum dots. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 53320−53334. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3387024
37. Achtstein A.W., Schliwa A., Prudnikau A., Hardzei M., Artemyev M.V., Thomsen C., Woggon U. Electronic structure and exciton–phonon interaction in two-dimensional colloidal CdSe nanosheets. *Nano Letters*, 2012, vol. 12, no. 6, pp. 3151−3157. https://doi.org/10.1021/nl301071n
38. Wuister S.F., de Mello Donegá C., Meijerink A. Luminescence temperature antiquenching of water-soluble CdTe quantum dots: role of the solvent. *Journal of the American Chemical Society*, 2004, vol. 126, no. 33, pp. 10397−10402. https://doi.org/10.1021/ja048222a
39. 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
40. Gurinovich L.I., Lutich A.A., Stupak A.P., Prislopsky S.Y., Gaponenko S.V., Rusakov E.K., Artemyev M.V., Demir H.V. Luminescence in quantum-confined cadmium selenide nanocrystals and nanorods in external electric fields. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 8, pp. 1008−1016. https://doi.org/10.1134/S1063782609080090
41. Wang Z., Huang Z., Liu G., Cai B., Zhang S., Wang Y. In-situ and reversible enhancement of photoluminescence from $CsPbBr_3$ nanoplatelets by electrical bias. *Advanced Optical Materials*, 2021, vol. 9, no. 15, pp. 2100346. https://doi.org/10.1002/adom.202100346
42. Gulyaev D.V., Zhuravlev K.S. Mechanism of the effect of the electric field of a surface acoustic wave on the low-temperature photoluminescence kinetics in type-II GaAs/AlAs superlattices. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 2, pp. 205−210. https://doi.org/10.1134/S1063782607020170
43. Daibagya D.S., Ambrozevich S.A., Perepelitsa A.S., Zakharchuk I.A., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Aslanov S.V., Osadchenko A.V., Selyukov A.S. Electric field influence on the recombination luminescence of the colloidal silver sulfide quantum dots. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 3(108), pp. 100–117. (in Russian). https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-3-100-117
44. Badawi A., Al-Hosiny N., Abdallah S., Negm S., Talaat H. Tuning photocurrent response through size control of CdTe quantum dots sensitized solar cells. *Solar Energy*, 2013, vol. 88, pp. 137−143. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.005
45. Wu S., Xia W. Exciton polarizability and absorption spectra in CdSe/ZnS nanocrystal quantum dots in electric fields. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 114, no. 4, pp. 043709. https://doi.org/10.1063/1.4816559
46. Rabouw F.T., Van Der Bok J.C., Spinicelli P., Mahler B., Nasilowski M., Pedetti S., Dubertret B., Vanmaekelbergh D. Temporary charge carrier separation dominates the photoluminescence decay dynamics of colloidal CdSe nanoplatelets. *Nano Letters*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 2047−2053. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00053
47. Rabouw F.T., Kamp M., van Dijk-Moes R.J., Gamelin D.R., Koenderink A.F., Meijerink A., Vanmaekelbergh D. Delayed exciton

Letters. 2015. V. 15. N 11. P. 7718−7725. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b03818
48. McCamy C.S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates // Color Research & Application. 1992. V. 17. N 2. P. 142−144. https://doi.org/10.1002/col.5080170211
49. Дайбаге Д.С. Спектральные и кинетические характеристики свернутых в виде свитков ультратонких нанопластин селенида кадмия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 5. С. 920–926. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-920-926
50. Жбанова В.Л. Система цветоделения на основе цветового треугольника для колориметрических исследований в микроскопии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 2. С. 236–244. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-236-244
51. Miller D.A.B., Chemla D.S., Damen T.C., Gossard A.C., Wiegmann W., Wood T.H., Burrus C.A. Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures // Physical Review B. 1985. V. 32. N 2. P. 1043–1060. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.32.1043
52. Xie Y., Cui Y., Zhang L., Yang M. Effect of electron–hole separation on the spectral diffusion of small-sized CdSe quantum dots under an external electric field // The Journal of Physical Chemistry C. 2023. V. 127. N 5. P. 2603−2611. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c07402
53. Achtstein A.W., Prudnikau A.V., Ermolenko M.V., Gurinovich L.I., Gaponenko S.V., Woggon U., Baranov A.V., Leonov M.Y., Rukhlenko I.D., Fedorov A.V., Artemyev M.V. Electroabsorption by 0D, 1D, and 2D nanocrystals: A comparative study of CdSe colloidal quantum dots, nanorods, and nanoplatelets // ACS Nano. 2014. V. 8. N 8. P. 7678−7686. https://doi.org/10.1021/nn503745u

emission and its relation to blinking in CdSe quantum dots. *Nano Letters*, 2015, vol. 15, no. 11, pp. 7718−7725. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b03818
48. McCamy C.S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Research & Application*, 1992, vol. 17, no. 2, pp. 142−144. https://doi.org/10.1002/col.5080170211
49. Daibagya D.S. Spectral and kinetic characteristics of ultrathin cadmium selenide nanoscrolls. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 920–926. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-920-926
50. Zhbanova V.L. Color triangle color separation system for colorimetric research in microscopy. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 236–244. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-236-244
51. Miller D.A.B., Chemla D.S., Damen T.C., Gossard A.C., Wiegmann W., Wood T.H., Burrus C.A. Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures. *Physical Review B*, 1985, vol. 32, no. 2, pp. 1043–1060. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.32.1043
52. Xie Y., Cui Y., Zhang L., Yang M. Effect of electron–hole separation on the spectral diffusion of small-sized CdSe quantum dots under an external electric field. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2023, vol. 127, no. 5, pp. 2603−2611. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c07402
53. Achtstein A.W., Prudnikau A.V., Ermolenko M.V., Gurinovich L.I., Gaponenko S.V., Woggon U., Baranov A.V., Leonov M.Y., Rukhlenko I.D., Fedorov A.V., Artemyev M.V. Electroabsorption by 0D, 1D, and 2D nanocrystals: A comparative study of CdSe colloidal quantum dots, nanorods, and nanoplatelets. *ACS Nano*, 2014, vol. 8, no. 8, pp. 7678−7686. https://doi.org/10.1021/nn503745u

Авторы

Дайбаге Даниил Саюзович — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; ассистент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, sc 57673090900, https://orcid.org/0000-0003-1944-1546, daibagya@mail.ru

Амброзевич 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 им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, sc 12789274600, https://orcid.org/0000-0002-3906-0735, s.ambrozevich@mail.ru

Захарчук Иван Александрович — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, sc 57672815700, https://orcid.org/0000-0002-1502-6460, zakharchukia@yandex.ru

Осадченко Анна Владимировна — ассистент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, sc 57439684100, https://orcid.org/0000-0001-9556-4885, osadchenkoav@student.bmstu.ru

Селюков Александр Сергеевич — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, sc 55787344500, https://orcid.org/0000-0002-4007-6291, selyukov@lebedev.ru

Authors

Daniil S. Daibagya — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Assistant, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, sc 57673090900, 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, s.ambrozevich@mail.ru

Ivan A. Zakharchuk — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, sc 57672815700, https://orcid.org/0000-0002-1502-6460, zakharchukia@yandex.ru

Anna V. Osadchenko — Assistant, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation; Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, sc 57439684100, https://orcid.org/0000-0001-9556-4885, osadchenkoav@student.bmstu.ru

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

Статья поступила в редакцию 27.02.2024
Одобрена после рецензирования 22.04.2024
Принята к печати 28.05.2024

Received 27.02.2024
Approved after reviewing 22.04.2024
Accepted 28.05.2024

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»