

УДК 538.977

## ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЭКСИТОННОЙ И РЕКОМБИНАЦИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdTe/SiO<sub>2</sub> (ЯДРО/ОБОЛОЧКА)

© 2024 г. Д. С. Дайбаге<sup>1, 2, \*</sup>, О. В. Овчинников<sup>3</sup>, М. С. Смирнов<sup>3</sup>, С. А. Амброзевич<sup>1, 2</sup>,  
И. А. Захарчук<sup>1</sup>, А. В. Осадченко<sup>1</sup>, А. С. Селюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Ленинский пр., 53, Москва, 119991 Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, 105005 Россия

<sup>3</sup>Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, 394006 Россия

\*e-mail: daibage@bmstu.ru

Поступила в редакцию 21.04.2024 г.

После доработки 31.07.2024 г.

Принята к публикации 31.07.2024 г.

Представлены результаты исследования временной динамики интенсивности фотолюминесценции квантовых точек теллурида кадмия, покрытых оболочкой диоксида кремния, при непрерывном оптическом облучении. Установлены как минимум два механизма, оказывающих влияние на излучение квантовых точек CdTe/SiO<sub>2</sub>. Обнаружено, что на ранних стадиях эксперимента наблюдается увеличение интенсивности люминесценции квантовых точек CdTe/SiO<sub>2</sub>, а на поздней стадии облучения начинает преобладать фотодеградация люминесценции. Первый механизм, связанный с фотоусилением, обусловлен пассивацией поверхностных дефектов молекулами воды и уменьшением количества центров безызлучательной рекомбинации, а второй механизм, связанный с фотодеградацией, объясняется фотоокислением ядра CdTe под действием кислорода.

**Ключевые слова:** люминесценция, квантовые точки, теллурид кадмия, диоксид кремния, фотоусиление, фотодеградация

DOI: 10.31857/S0002337X24070045, EDN: LQYJLA

### ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые коллоидные квантовые структуры [1–5], в частности нуль-мерные наночастицы — квантовые точки (КТ) [6–9] — представляют значительный интерес для решения задач современной оптоэлектроники и фотоники благодаря своим уникальным размерно-зависимым и нелинейным оптическим свойствам [10–14]. При этом фотолюминесценция (ФЛ) квантовых точек может быть связана как с межзонными переходами (между зоной проводимости и валентной зоной), так и переходами с участием поверхностных ловушек [15–18]. Кроме того, на свойства КТ и коллоидных нанокристаллов различ-

ной морфологии могут оказывать влияние внешние факторы, такие как температура [19] или электрическое поле [20–23]. При увеличении температуры могут происходить смещение и уширение полос излучения, а также тушение интенсивности как экситонной, так и рекомбинационной люминесценции [24, 25]. Внешнее электрическое поле зачастую приводит к тушению интенсивности люминесценции вследствие уменьшения интеграла перекрытия между волновыми функциями электрона и дырки под действием электрического поля [26]. Однако на люминесцентные свойства КТ влияют не только описанные внешние факторы — оптические свойства коллоидных

нанокристаллов могут также изменяться со временем [27, 28]. Так, например, возможны процессы фотодеградации [29] или фотоусиления [30] интенсивности ФЛ коллоидных наночастиц. Фотодеградация может происходить за счет окисления на воздухе [31], отрыва лигандов [32] или/и вследствие неоднородного покрытия ядра КТ оболочкой [33]. Фотоусиление ФЛ может возникать за счет нагрева нанокристаллов под действием лазерного облучения (термический отжиг уменьшает количество ловушек) [34], за счет адсорбции молекул воды на интерфейсах КТ (происходит пассивация ловушек) [28], за счет стабилизации молекулами поверхностно-активных веществ (происходит пассивация ловушек) [35], за счет фотоокисления и фотокоррозии КТ (исчезают дефекты на поверхности) [33]. Многие авторы отмечают, что покрытие КТ полупроводниковой оболочкой способствует большей фотостабильности их оптических свойств и увеличению квантового выхода ФЛ [36, 37]. Однако не всегда КТ типа ядро/оболочка являются абсолютно фотостабильными [38]. Таким образом, исследование фотостабильности и, наоборот, фотодеградации и фотоусиления люминесцентных свойств сферических полупроводниковых наночастиц является перспективным направлением, поскольку понимание механизмов и процессов, которые протекают в КТ, позволяет улучшить их свойства и повысить эффективность устройств на основе подобного рода коллоидных нанокристаллов.

Целью работы было изучение временной динамики межзонной и рекомбинационной люминесценции сферических наночастиц CdTe/SiO<sub>2</sub>.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез сферических наночастиц CdTe/SiO<sub>2</sub> проводили с использованием поверхностных лигандов с тиоловой группой с последующим их замещением [39], где в качестве прекурсора теллура выступал порошок оксида теллура, а в качестве прекурсора кадмия – бромид кадмия. Конечная смесь представляла собой раствор сферических наночастиц в водной среде.

Морфологию КТ исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Использовали микроскоп JEOL JEM-2100 с ускоряющим напряжением 200 кВ. На основе ПЭМ-изображения определяли распределение КТ по размерам.

Для регистрации спектров ФЛ в качестве источника излучения использовали непрерывный светодиод Luxeon III Star, излучающий на длине волны 405 нм, средняя мощность излучения составляла 125 мВт, а в качестве приемника люминесценции – спектрометр с ПЗС-матрицей Ocean Optics Maya 2000Pro.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ПЭМ-изображения (рис. 1а) показал, что синтезированные коллоидные полупроводниковые наночастицы CdTe/SiO<sub>2</sub> имеют форму, близкую к сферической. Из гистограммы (рис. 1б), которая соответствует распределению по размерам КТ, видно, что средний размер КТ составляет порядка 2.16 нм с дисперсией 0.29 нм. Нужно учесть, что полученное значение среднего размера (2.16 нм) включает в себя как размер ядра CdTe, так и толщину оболочки SiO<sub>2</sub>.

В спектре ФЛ (рис. 2а) наблюдается явно выраженная экситонная полоса, максимум интенсивности которой приходится на длину волны 523 нм, ее полная ширина на полувысоте составила 58 нм. В красной области спектра присутствует небольшое уширение полосы ФЛ, связанное с наличием излучательных переходов с участием ловушек. Стоит отметить, что вклад таких переходов в спектр ФЛ гораздо меньше, чем вклад ФЛ, обусловленной межзонными переходами. Спектр ФЛ исследуемых КТ смещен в синюю область относительно более крупных КТ и объемного полупроводника CdTe, что обусловлено квантово-размерным эффектом [40].

Для исследования временной динамики интенсивности ФЛ КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> регистрировали спектры ФЛ при непрерывном оптическом возбуждении в течение длительного времени. Эксперимент проводился в два этапа (два дня). В первый день (“День 1”) каждые 5 мин регистрировали спектры ФЛ

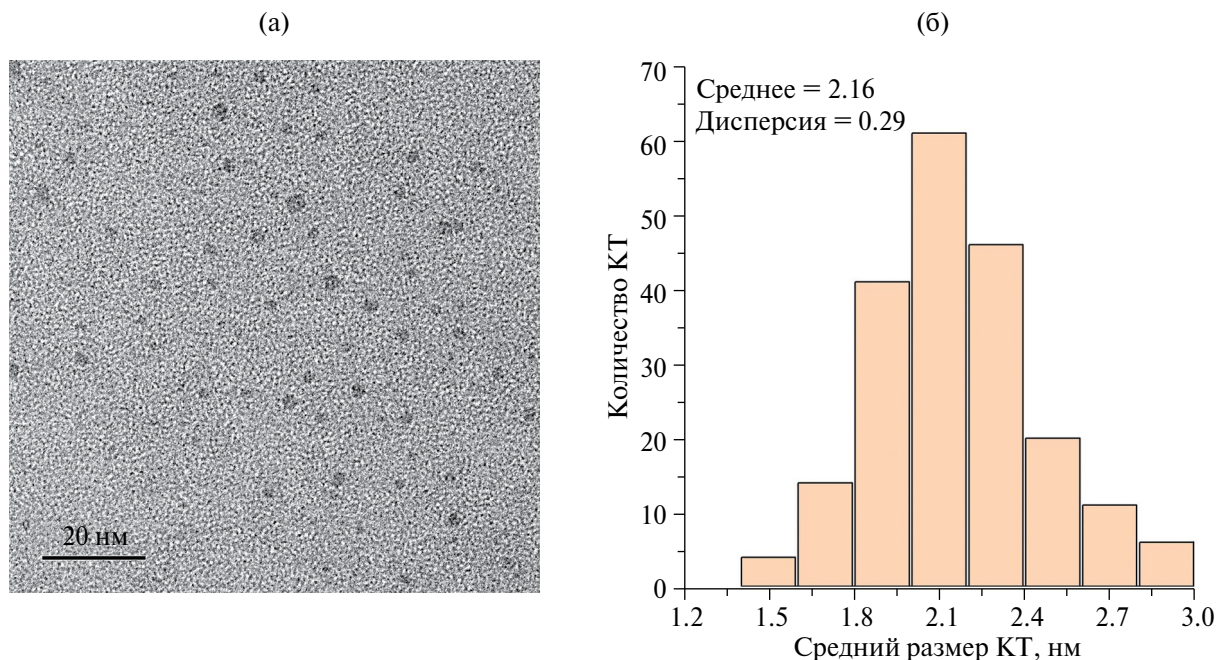


Рис. 1. Морфология КТ: ПЭМ-изображение (а) и распределение по размерам (б).

КТ при непрерывном облучении светодиодом в течение 7 ч. Затем возбуждающее излучение выключали на 1 день. Во второй день (“День 2”) КТ повторно облучали в течение 7 ч и регистрировали спектры ФЛ аналогично первому дню.

На рис. 2а представлена репрезентативная серия спектров ФЛ КТ CdTe/SiO<sub>2</sub>, полученных в результате эксперимента “День 1”. Видно, что за время эксперимента “День 1” при непрерывном оптическом возбуждении происходило фотоусиление интенсивности

люминесценции КТ. Интенсивность экситонной полосы увеличилась примерно на 60%.

Для количественной оценки наблюдаемого эффекта фотоусиления рассчитывали интегральную интенсивность (ИИ) ФЛ КТ. Под интегральной интенсивностью следует понимать площадь под спектром ФЛ. На рис. 3 представлена зависимость ИИ ФЛ от времени при непрерывном оптическом возбуждении за “День 1” (красные квадраты). Видно, что за 7 ч ИИ ФЛ исследуемых КТ

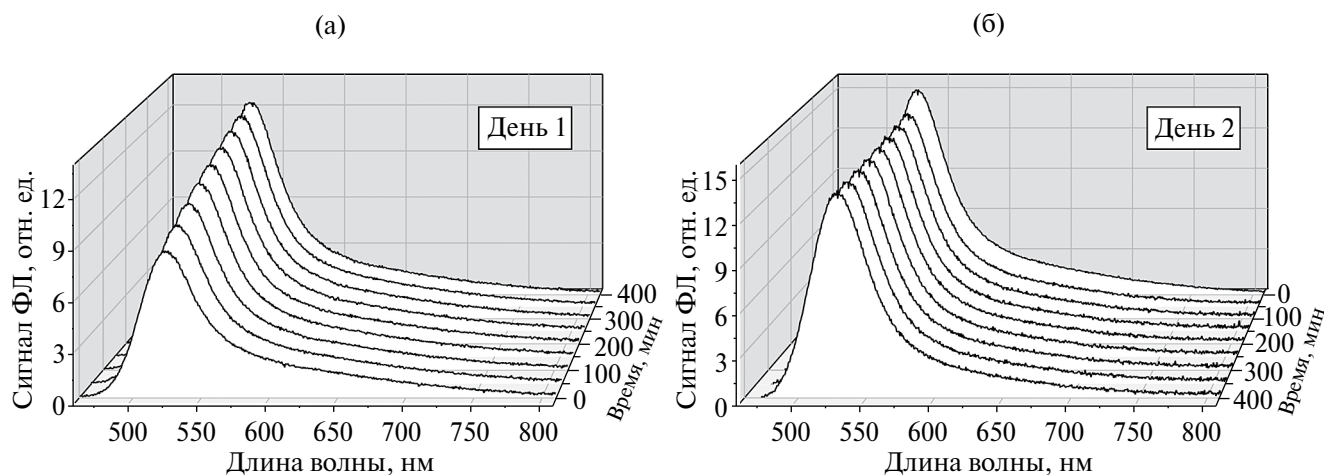
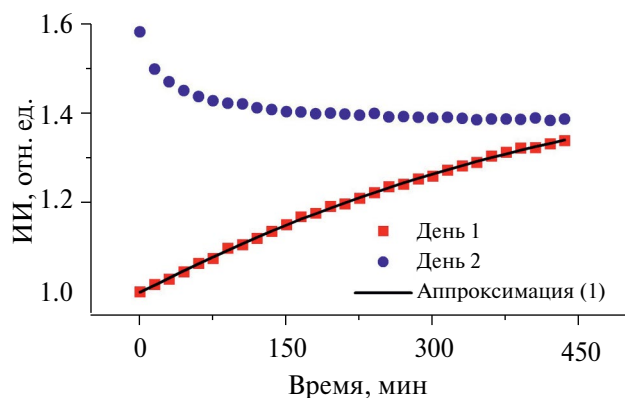


Рис. 2. Репрезентативная серия спектров ФЛ КТ CdTe/SiO<sub>2</sub>, зарегистрированных при непрерывном оптическом облучении: “День 1” (а) и “День 2” (б).



**Рис. 3.** Зависимости ИИ ФЛ при непрерывном оптическом облучении от времени за “День 1” (красные квадраты) и “День 2” (синие круги); черная кривая — аппроксимация с помощью выражения (1).

увеличилась примерно на 34%. Подобное фотоусиление интенсивности ФЛ коллоидных полупроводниковых КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> связано с адсорбцией молекул воды на поверхности КТ [28]. При адсорбции молекулы воды пассивируют поверхностные дефекты, тем самым уменьшая вероятность безызлучательных переходов с участием ловушек, что в свою очередь приводит к увеличению интенсивности ФЛ КТ [28, 30, 41].

Для моделирования временной динамики процесса фотоусиления интенсивности ФЛ КТ можно использовать экспоненциальную функцию вида [41]

$$I(t) = I_m + A \exp \left[ - \left( \frac{t}{\tau} \right)^\beta \right], \quad (1)$$

где  $I(t)$  — зависимость интенсивности ФЛ от времени,  $I_m$  — конечное значение интенсивности ФЛ при  $t \rightarrow \infty$ ,  $t$  — время,  $A$  — параметр, характеризующий изменение интенсивности ФЛ за время фотоусиления (начальное значение  $I_0$  минус конечное значение  $I_m$ ),  $\tau$  — характерная постоянная времени и  $\beta$  — параметр растяжения экспоненциальной функции. При этом величину  $\xi = 3^{\frac{1}{\beta}} \tau$  можно интерпретировать как время, за которое интенсивность ФЛ изменяется на 95% [41]. Результаты аппроксимации приведены в табл. 1 (предварительно проводили нормировку спектров ФЛ на максимум интенсивности люминесценции при  $t = 0$ ).

**Таблица 1.** Параметры, полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных за “День 1” с помощью выражения (1)

$I_m$	$A$	$\tau$ , мин	$\beta$	$\xi$ , мин
1.54	-0.54	434.14	1.05	1236.04 (20.60 ч)

Из рис. 3 видно, что теоретическая кривая (1) достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными за “День 1”. Можно предположить, что при более длительном аналогичном эксперименте (порядка 20 ч) ИИ ФЛ коллоидных КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> увеличится на 95%. Однако, как будет показано далее, во время эксперимента “День 2” наблюдалось уменьшение ИИ со временем.

Синими кругами на рис. 3 показана зависимость ИИ ФЛ КТ от времени при непрерывном оптическом возбуждении за “День 2” (репрезентативная серия спектров ФЛ за второй день представлена на рис. 2б). Видно, что ИИ ФЛ выросла относительно последнего измерения ИИ ФЛ за “День 1”. В результате ИИ ФЛ увеличилась на 58% относительно начала эксперимента по регистрации временной динамики интенсивности ФЛ. Увеличение ИИ ФЛ между этапами “День 1” и “День 2” можно объяснить тем фактом, что процесс пассивации поверхностных дефектов молекулами воды не зависит от наличия оптического облучения и не прекращается в его отсутствие.

За время эксперимента “День 2”, однако, наблюдалось уменьшение интенсивности ФЛ КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> (рис. 3). За 7 ч непрерывного облучения ИИ ФЛ уменьшилась примерно на 12%. В результате двух этапов экспериментов ИИ ФЛ увеличилась на 39% относительно начального момента времени (“День 1”,  $t = 0$ ). Увеличение интенсивности ФЛ за этап облучения “День 1” и медленное уменьшение интенсивности ФЛ за этап “День 2” свидетельствуют о наличии как минимум двух конкурирующих процессов, влияющих на излучение исследуемых КТ. Первый процесс, отвечающий за фотоусиление, обусловлен адсорбцией молекул воды на интерфейсах КТ и, как следствие, пассивацией центров безызлучатель-

ной рекомбинации (доминирует на ранних стадиях). Второй процесс, отвечающий за фотодеградацию, связан с фотоокислением ядра CdTe под действием кислорода (проявляется на поздних стадиях). Молекулы кислорода медленно диффундируют через оболочку SiO<sub>2</sub> к ядру CdTe, окисляя тем самым поверхность КТ. Длительное воздействие кислорода вызывает образование новых поверхностных ловушек и приводит к тушению интенсивности ФЛ [27, 28].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе спектральных исследований установлено, что излучение КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> в большей степени происходит вследствие межзонных переходов, однако в длинноволновой области спектра наблюдается слабая люминесценция с участием ловушек. Спектр люминесценции КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> смещен в синюю область спектра относительно спектра ФЛ объемного кристалла CdTe, что связано с проявлением квантово-размерного эффекта.

Обнаружено, что пассивация молекулами воды ловушек происходит как при непрерывном оптическом облучении, так и в его отсутствие. Пассивация ловушек в свою очередь приводит к фотоусилению ФЛ. При более длительном облучении, когда КТ долгое время находится на воздухе, происходит фотодеградация люминесцентных свойств исследуемых наночастиц. Длительное воздействие кислорода на ядро CdTe вызывает образование новых поверхностных ловушек, что и приводит к фотодеградации.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Структурные исследования образцов КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2021-1351.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Behrle R., Krause V., Seifner M.S., Köstler B., Dick K.A., Wagner M., Sistani M., Barth S.* Electrical and Structural Properties of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> Nanowires Prepared from a Single-Source Precursor // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 4. P. 627. <https://doi.org/10.3390/nano13040627>
2. *Дайбаге Д.С., Захарчук И.А., Осадченко А.В., Селюков А.С., Амброзович С.А., Скориков М.Л., Васильев Р.Б.* Люминесцентные и колориметрические свойства ультратонких наносвитков селенида кадмия // *Кр. Сообщ. по физике ФИАН*. 2023. Т. 50. № 11. С. 83–91.
3. *Meliakov S.R., Belykh V.V., Kalitukha I.V., Golovatenko A.A., Di Giacomo A., Moreels I., Rodina A.V., Yakovlev D.R.* Coherent Spin Dynamics of Electrons in CdSe Colloidal Nanoplatelets // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 23. P. 3077. <https://doi.org/10.3390/nano13233077>
4. *Grevtseva I., Ovchinnikov O., Smirnov M., Perepelitsa A., Chevychelova T., Derepko V., Osadchenko A., Selyukov A.* IR Luminescence of Plexcitonic Structures Based on Ag<sub>2</sub>S/L-Cys Quantum Dots and Au Nanorods // *Opt. Express*. 2022. V. 30. № 4. P. 4668–4679. <https://doi.org/10.1364/OE.447200>
5. *Babaev A.A., Skurlov I.D., Cherevko S.A., Parfenov P.S., Baranov M.A., Kuzmenko N.K., Koroleva A.V., Zhizhin E.V., Fedorov A.V.* PbSe/PbS Core/Shell Nanoplatelets with Enhanced Stability and Photoelectric Properties // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 23. P. 3051. <https://doi.org/10.3390/nano13233051>
6. *Chae Y.B., Kim S.Y., Choi H.D., Moon D.G., Lee K.H., Kim C.K.* Enhancing Efficiency in Inverted Quantum Dot Light-Emitting Diodes through Arginine-Modified ZnO Nanoparticle Electron Injection Layer // *Nanomaterials*. 2024. V. 14. № 3. P. 266. <https://doi.org/10.3390/nano14030266>
7. *Tosa K., Ding C., Chen S., Hayase S., Shen Q.* Classifying the Role of Surface Ligands on the Passivation and Stability of Cs<sub>2</sub>NaInCl<sub>6</sub> Double Perovskite Quantum Dots // *Nanomaterials*. 2024. V. 14. № 4. P. 376. <https://doi.org/10.3390/nano14040376>
8. *Дайбаге Д.С., Амброзович 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 вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 6. С. 1098–1103. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1098-1103>
9. *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 // *J. Lumin.* 2022. V. 248. P. 118874. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.118874>
  10. *Korepanov O., Kozodaev D., Aleksandrova O., Bugrov A., Firsov D., Kirilenko D., Mazing D., Moshnikov V., Shomakhov Z.* Temperature- and Size-Dependent Photoluminescence of CuInS<sub>2</sub> Quantum Dots // *Nanomaterials.* 2023. V. 13. № 21. P. 2892. <https://doi.org/10.3390/nano13212892>
  11. *Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Korolev N.V., Golovinski P.A., Vitukhnovsky A.G.* The Size Dependence Recombination Luminescence of Hydrophilic Colloidal CdS Quantum Dots in Gelatin // *J. Lumin.* 2016. V. 179. P. 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.07.016>
  12. *Yu W. W., Qu L., Guo W., Peng X.* Experimental Determination of the Extinction Coefficient of CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals // *Chem. Mater.* 2003. V. 15. № 14. P. 2854–2860. <https://doi.org/10.1021/cm034081k>
  13. *Bhakti B., Datta S., Ghosh M.* Influence of Spatial Extension of Impurity on the Nonlinear Optical Properties of Doped GaAs Quantum Dot in Presence of Noise // *Mod. Phys. Lett. B.* 2024. V. 38. № 5. P. 2350242. <https://doi.org/10.1142/S0217984923502421>
  14. *Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Chevycheva T.A., Zvyagin A.I., Selyukov A.S.* Nonlinear Absorption Enhancement of Methylene Blue in the Presence of Au/SiO<sub>2</sub> Core/Shell Nanoparticles // *Dyes Pigments.* 2022. V. 197. P. 109829. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109829>
  15. *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<sub>2</sub>S 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>
  16. *Deng Z., Guyot-Sionnest P.* Intraband Luminescence from HgSe/CdS Core/Shell Quantum Dots // *ACS Nano.* 2016. V. 10. № 2. P. 2121–2127. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b06527>
  17. *Grevtseva I.G., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Perepelitsa A.S., Chevycheva T.A., Derepko V.N., Osadchenko A.V., Selyukov A.S.* The Structural and Luminescence Properties of Plexcitonic Structures Based on Ag<sub>2</sub>S/I-Cys Quantum Dots and Au Nanorods // *RSC Adv.* 2022. V. 12. № 11. P. 6525–6532. <https://doi.org/10.1039/D1RA08806H>
  18. *Дайбаге Д. С.* Спектральные и кинетические характеристики свернутых в виде свитков ультратонких нанопластин селенида кадмия // Научно-технический вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 5. С. 920–926. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-920-926>
  19. *Du J., Feng A., Poelman D.* Temperature Dependency of Trap-Controlled Persistent Luminescence // *Laser Photonics Rev.* 2020. V. 14. № 8. P. 2000060. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000060>
  20. *Wang Z., Huang Z., Liu G., Cai B., Zhang S., Wang Y.* In-Situ and Reversible Enhancement of Photoluminescence from CsPbBr<sub>3</sub> Nanoplatelets by Electrical Bias // *Adv. Opt. Mater.* 2021. V. 9. № 15. P. 2100346. <https://doi.org/10.1002/adom.202100346>
  21. *Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Перепелица А.С., Захарчук И.А., Смирнов 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 // *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки.* 2023. № 3. С. 100–117. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-3-100-117>
  22. *Муравицкая А.О., Гуринович Л.И., Прудников А.В., Артемьев М.В., Гапоненко С.В.* Влияние внешнего электрического поля на фотолюминесценцию коллоидных наночастиц CdSe различной топологии // *Оптика*

- и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 1. С. 91–95. <https://doi.org/10.7868/S0030403417010214>
23. *Nakabayashi T., Ohshima R., Ohta N.* Electric Field Effects on Photoluminescence of CdSe Nanoparticles in a PMMA Film // *Crystals*. 2014. V. 4. № 2. P. 152–167. <https://doi.org/10.3390/cryst4020152>
24. *Kushavah D., Mohapatra P.K., Ghosh P., Singh M., Vasa P., Bahadur D., Singh B.P.* Photoluminescence Characteristics of CdSe Quantum Dots: Role of Exciton–Phonon Coupling and Defect/Trap States // *Mater. Res. Express*. 2017. V. 4. № 7. P. 075007. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa7a4f>
25. *de Mello Donegá C., Bode M., Meijerink A.* Size- and Temperature-Dependence of Exciton Lifetimes in CdSe Quantum Dots // *Phys. Rev. B*. 2006. V. 74. № 8. P. 085320. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.085320>
26. *Vitukhnovsky A.G., Selyukov A.S., Solovey V.R., Vasiliev R.B., Lazareva E.P.* Photoluminescence of CdTe Colloidal Quantum Wells in External Electric Field // *J. Lumin.* 2017. V. 186. P. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.02.041>
27. *Moon H., Lee C., Lee W., Kim J., Chae H.* Stability of Quantum Dots, Quantum Dot Films, and Quantum Dot Light-Emitting Diodes for Display Applications // *Adv. Mater.* 2019. V. 31. № 34. P. 1804294. <https://doi.org/10.1002/adma.201804294>
28. *Patra S., Samanta A.* Effect of Capping Agent and Medium on Light-Induced Variation of the Luminescence Properties of CdTe Quantum Dots: a Study Based on Fluorescence Correlation Spectroscopy, Steady State and Time-Resolved Fluorescence Techniques // *J. Phys. Chem. C*. 2014. V. 118. № 31. P. 18187–18196. <https://doi.org/10.1021/jp5048216>
29. *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<sub>2</sub>S Colloidal Quantum Dots // *IEEE Access*. 2024. V. 12. P. 53320–53334. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3387024>
30. *Zaini M.S., Ying Chyi Liew J., Alang Ahmad S.A., Mohamad A.R., Kamarudin M.A.* Quantum Confinement Effect and Photoenhancement of Photoluminescence of PbS and PbS/MnS Quantum Dots // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. № 18. P. 6282. <https://doi.org/10.3390/app10186282>
31. *Cordero S.R., Carson P.J., Estabrook R.A., Strouse G.F., Buratto S.K.* Photo-Activated Luminescence of CdSe Quantum Dot Monolayers // *J. Phys. Chem. B*. 2000. V. 104. № 51. P. 12137–12142. <https://doi.org/10.1021/jp001771s>
32. *Aldana J., Wang Y.A., Peng X.* Photochemical Instability of CdSe Nanocrystals Coated by Hydrophilic Thiols // *JACS*. 2001. V. 123. № 36. P. 8844–8850. <https://doi.org/10.1021/ja016424q>
33. *Carrillo-Carrión C., Cárdenas S., Simonet B.M., Valcárcel M.* Quantum Dots Luminescence Enhancement due to Illumination with UV/Vis Light // *Chem. Commun.* 2009. № 35. P. 5214–5226. <https://doi.org/10.1039/B904381K>
34. *Cai Q., Zhou H., Lu F.* Enhanced Infrared Response of Si Base p–n Diode with Self-Assembled Ge Quantum Dots by Thermal Annealing // *Appl. Surf. Sci.* 2008. V. 254. № 11. P. 3376–3379. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.11.019>
35. *Bao H., Gong Y., Li Z., Gao M.* Enhancement Effect of Illumination on the Photoluminescence of Water-Soluble CdTe Nanocrystals: Toward Highly Fluorescent CdTe/CdS Core–Shell Structure // *Chem. Mater.* 2004. V. 16. № 20. P. 3853–3859. <https://doi.org/10.1021/cm049172b>
36. *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 Appl. Nano Mater.* 2023. V. 6. № 2. P. 1285–1294. <https://doi.org/10.1021/acsnm.2c04936>
37. *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 // *J. Phys. Chem. B*. 1997. V. 101. № 46. P. 9463–9475. <https://doi.org/10.1021/jp971091y>
38. *Van Sark W.G., Frederix P.L., Van den Heuvel D.J., Gerritsen H.C., Bol A.A., Van Lingen J.N., de Mello Donegá C., Meijerink A.* Photooxidation and Photobleaching of Single CdSe/ZnS Quantum Dots Probed by Room-Temperature Time-Resolved Spectroscopy // *J. Phys. Chem. B*. 2001. V. 105. № 35. P. 8281–8284. <https://doi.org/10.1021/jp012018h>

39. *Daibagya D.S., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Selyukov A.S.* Emission behaviour of CdTe/SiO<sub>2</sub> Core/Shell Quantum Dots in External Electric Field // *Opt. Mater.* 2024. V. 150. P. 115297. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115297>
40. *Sathyamoorthy R., Sudhagar P., Kumar R. S., Sathyadevan T. M.* Low-Temperature Synthesis of Thiol-Functionalized CdTe Nanoclusters with Different Tellurium Contents // *Cryst. Res. Technol.* 2010. V. 45. № 1. P. 99–103. <https://doi.org/10.1002/crat.200900479>
41. *Llopis M.V., Rodríguez J.C.C., Martín F.J.F., Coto A.M., Fernandez-Argueelles M.T., Costa-Fernández J.M., Sanz-Medel A.* Dynamic Analysis of the Photoenhancement Process of Colloidal Quantum Dots with Different Surface Modifications // *Nanotechnology.* 2011. V. 22. № 38. P. 385703. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/38/385703>