

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-920-926

УДК 538.958

## Спектральные и кинетические характеристики свернутых в виде свитков ультратонких нанопластин селенида кадмия

Даниил Саюзович Дайбаге✉

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация  
Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

daibagya@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

### Аннотация

**Введение.** Исследованы при комнатной температуре оптические и люминесцентные свойства ультратонких коллоидных полупроводниковых нанопластин селенида кадмия, свернутых в виде свитков толщиной 2,5 монослоя. **Метод.** Для коллоидного синтеза объектов исследования применен ацетат кадмия дигидрат  $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и триоктилфосфинселенид в качестве прекурсоров кадмия и селена соответственно, а также использованы растворы олеиновой кислоты и октадецена. Регистрация сигнала люминесценции скрученных наноструктур проведена с помощью волоконного ПЗС-спектрометра. Кривые затухания фотолюминесценции нанокристаллов получены методом время-коррелированного счета одиночных фотонов в максимуме интенсивности люминесценции. **Основные результаты.** Обнаружено, что люминесценция исследуемых образцов характеризуется как межзонными переходами, так и переходами с участием дефектных уровней. Установлено, что нормированное число фотонов, регистрируемых при исследовании затухания рекомбинационной люминесценции, в 45 раз превышает аналогичное значение для экситонной люминесценции при идентичных условиях эксперимента. Определены доминирующая длина волны люминесценции, цветовые координаты, чистота цвета и коррелированная цветовая температура коллоидных полупроводниковых ультратонких нанопластин селенида кадмия, свернутых в виде свитков. Выполнено сравнение полученных результатов с аналогичными колориметрическими характеристиками для более толстых коллоидных полупроводниковых наноструктур селенида кадмия из известных научных работ. **Обсуждение.** Наблюдаемые эффекты свидетельствуют о том, что использование ультратонких свернутых нанокристаллов селенида кадмия является перспективным для создания светодиодов на их основе.

### Ключевые слова

фотолюминесценция, наночастицы, наносвитки, селенид кадмия, цветовые координаты, чистота цвета, цветовая температура

### Благодарности

Автор выражает благодарность Р.Б. Васильеву за предоставленные наноструктуры, а также М.Л. Скорикову, А.С. Селюкову и С.А. Амброзевичу за полезное обсуждение результатов.

**Ссылка для цитирования:** 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. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-920-926

## Spectral and kinetic characteristics of ultrathin cadmium selenide nanoscrolls

Daniil S. Daibagya✉

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation  
Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

daibagya@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

© Дайбаге Д.С., 2023

**Abstract**

We have studied the optical and luminescence properties at room temperature of ultrathin colloidal semiconductor cadmium selenide nanoscrolls with a thickness of 2.5 monolayers. For colloidal synthesis of the objects under study, cadmium acetate dihydrate  $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and trioctylphosphine selenide were used as precursors of cadmium and selenium, respectively, and solutions of oleic acid and octadecene were also used. Luminescence spectrum of cadmium selenide nanoscrolls was recorded using a fiber charge coupled device spectrometer. Spectrally resolved photoluminescence decays for nanoparticles were measured with the use of time-correlated single photon counting technique. The emission of the cadmium selenide nanoscrolls consists of interband and recombination luminescence bands. We found that the normalized photon numbers of recombination luminescence are larger than the normalized photon numbers of interband luminescence. We determined dominant wavelengths, chromaticity coordinates, and correlated color temperatures of ultrathin colloidal semiconductor cadmium selenide nanoscrolls. These ultrathin cadmium selenide nanoscrolls are promising for application in light-emitting diodes.

**Keywords**

photoluminescence, nanoparticles, nanoscrolls, cadmium selenide, chromaticity coordinates, color purity, correlated color temperature

**Acknowledgements**

Author is grateful to R.B. Vasiliev for providing the nanostructures as well as to M.L. Skorikov, A.S. Selyukov and S.A. Ambrozevich for helpful discussions.

**For citation:** 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). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-920-926

**Введение**

С фундаментальной точки зрения интерес представляют процессы и механизмы межзонной и рекомбинационной люминесценции полупроводниковых наноструктур [1–5]. Их преимущество по сравнению с объемными полупроводниками заключается в том, что энергетическую структуру зон наночастиц, а значит и оптические спектры, можно настраивать вариацией размеров [6–10]. Нанокристаллы селенида кадмия ( $\text{CdSe}$ ) планарной геометрии, свернутые в виде наносвитков, представляют особый интерес вследствие отличия эффектов размерного квантования от наблюдающихся в наноструктурах другой морфологии [11–13]. Ранее было установлено, что экситонная фотолюминесценция (ФЛ) нанопластин и наносвитков  $\text{CdSe}$ , средняя толщина которых составляет не менее четырех монослоев (МС), состоящие из атомных плоскостей  $\text{Cd}$  и  $\text{Se}$ , приходится на диапазон длин волн порядка 480 нм и более [11, 14, 15]. Таким образом, существующие на данный момент планарные нанокристаллы  $\text{CdSe}$  нельзя использовать в качестве источника фиолетового излучения. Решением данной проблемы может быть уменьшение толщины нанопластин  $\text{CdSe}$ , которое приведет к смещению полосы экситонной люминесценции в высокоэнергетическую область видимого спектра.

Несмотря на наличие большого объема как экспериментальных, так и теоретических исследований, посвященных планарным нанокристаллам  $\text{CdSe}$ , экспериментальные данные об оптических свойствах наиболее тонких популяций таких полупроводниковых нанокристаллов, свернутых в свитки, отсутствуют. Цель настоящей работы — восполнить данный пробел и представить исследование оптических и люминесцентных характеристик ультратонких коллоидных нанопластин  $\text{CdSe}$ , что в дальнейшем позволит добиться более полного понимания особенностей их люминесценции.

**Методика эксперимента**

Исследуемые нанопластины  $\text{CdSe}$ , толщина которых составила 2,5 МС, были синтезированы методами коллоидной химии в соответствии с описанной в работах [16, 17] процедурой. Раствор, состоящий из 0,25 ммоль ацетата кадмия дигидрата  $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0,1 ммоль олеиновой кислоты (ОА) и 5 мл октадецена (ОДЕ), был загружен в реакционную колбу объемом 25 мл и дегазирован при комнатной температуре в течение 30 мин в потоке аргона. Затем температура была повышена до 393 К и в колбу введен в качестве источника селена в объеме 0,15 мл 1 М раствора триоктилфосфинселенида, разбавленного 0,35 мл ОДЕ. Рост нанокристаллов осуществлен в течение 180 мин при температуре 393 К и остановлен введением в колбу 0,5 мл ОА при снижении температуры до комнатной. Полученные коллоидные наноструктуры осаждались добавлением к реакционной смеси равного объема ацетона, отделялись центрифугированием на скорости 5000 об/мин и несколько раз промывались ацетоном с последующим центрифугированием. Далее наноструктуры диспергировались в 4 мл чистого гексана. Полученные образцы представляют собой свернутые в виде свитков полупроводниковые квазидвумерные наноструктуры  $\text{CdSe}$ , аналогичные полученным в работе [18].

Спектральная зависимость оптической плотности раствора нанопластин  $\text{CdSe}$  в гексане регистрировалась с помощью спектрофотометра Specord M40 в диапазоне областей от 200 до 900 нм.

Для измерения спектра фотолюминесценции исследуемых наносвитков использован волоконный спектрометр Ocean Optics Maya 2000 Pro с ПЗС-матрицей, диапазон длин волн регистрации которого составил 200–1100 нм. В качестве источника возбуждения применен импульсный лазер Coherent Mira 900, который излучал в области 350 нм со средней мощностью 96 мВт и имел длительность импульсов 3 пс. Частота повторения импульсов лазера составила 76 МГц.

Кинетические зависимости ФЛ наносвитков CdSe получены с помощью метода время-коррелированного счета одиночных фотонов. Для возбуждения ФЛ образца использован лазер Coherent Mira 900 с длиной волны излучения 350 нм. Средняя мощность лазерного излучения составила 3 мВт, длительность импульсов 3 пс, а частота повторения импульсов лазера выбрана 1,9 МГц. Излучение образца зарегистрировано сопряженным с монохроматором фотоэлектронным умножителем PicoQuant PMA-C 192-N-M, чувствительным в диапазоне 250–850 нм и работающим в режиме счета одиночных фотонов. Фотоэлектронный умножитель был подключен к плате счета одиночных фотонов PicoQuant TimeHarp 100.

На основе полученных спектров люминесценции были определены колориметрические характеристики излучения исследуемых нанокристаллов. Цветовые координаты, коррелированная цветовая температура, доминирующая длина волны и чистота цвета  $p$  рассчитаны по методике, описанной в работах [19, 20].

### Результаты и их обсуждение

В спектре поглощения (рис. 1, *a*) наносвитков CdSe наблюдаются два экситонных пика на длинах волн 373 нм и 394 нм, которые характеризуются переходами  $1S_{lh}-1S_e$  и  $1S_{hh}-1S_e$  между подзонами легких ( $lh$ ) и тяжелых ( $hh$ ) дырок в валентной зоне и зоной проводимости.

Выполним оценку ширины запрещенной зоны нанокристалла ( $E_g$ , эВ) на основании толщины ( $d$ , нм) исследуемых наноструктур CdSe с помощью эмпирической зависимости [21]:

$$E_g = 1,49 + \frac{1,27}{d}.$$

В результате расчета получено значение  $d = 0,77$  нм, что соответствует 2,5 МС CdSe [21, 22].

В фиолетовой области спектра ФЛ (рис. 1, *a*) наблюдается полоса люминесценции, обусловленная межзонными переходами, максимум интенсивности которой приходится на длину волны 397 нм, а пол-

ная ширина на полувысоте полосы составляет 12 нм. В сравнении со сферическими квантовыми точками, небольшой Stokes сдвиг (3 нм) обусловлен меньшей величиной энергетического расщепления между синглетным и триплетным экситонами [23]. В красной области спектра наблюдается широкая полоса люминесценции, связанная с рекомбинацией носителей заряда на дефектных состояниях наноструктур [11]. Максимум полосы рекомбинационной люминесценции получен на длине волны 580 нм, а полная ширина на полувысоте — 196 нм.

Полученные спектры ФЛ исследуемых свернутых нанопластин сравнимы со спектром излучения Солнца (рис. 1, *b*). Отличием является отсутствие инфракрасного «хвоста» в области более 800 нм, а также малая интенсивность люминесценции в синей и фиолетовой областях спектра. Это может быть полезно для создания новых источников света со спектром, близким к солнечному, у которых практически отсутствуют вредные для зрения спектральные компоненты.

Полосы поглощения и ФЛ исследуемых нанокристаллов CdSe, средняя толщина которых 0,77 нм, оказались смещены в синюю область спектра по сравнению с более толстыми планарными нанокристаллами CdSe [11], наносвитками [14] и объемным кристаллом CdSe [24]. Данный факт объясняется проявлением квантово-размерного эффекта. Например, в работе [11] был продемонстрирован дискретный характер изменения положения максимума обусловленной межзонными переходами ФЛ планарных нанокристаллов CdSe в зависимости от толщины — при увеличении толщины увеличивалась длина волны максимума. В результате получены значения толщин: 461, 509 и 558 нм. Результаты данной работы для ультратонких нанопластин CdSe с соответствующим значением максимума 397 нм расширил результаты работы [11].

На рис. 2, *a* представлены кривые затухания ФЛ коллоидных полупроводниковых наносвитков CdSe, толщиной 0,77 нм. Кривая *A* характеризует затухание ФЛ, обусловленной межзонными переходами, а кривая *B* — затухание ФЛ с участием дефектных уровней. Видно, что эти кривые имеют неэкспоненциальный

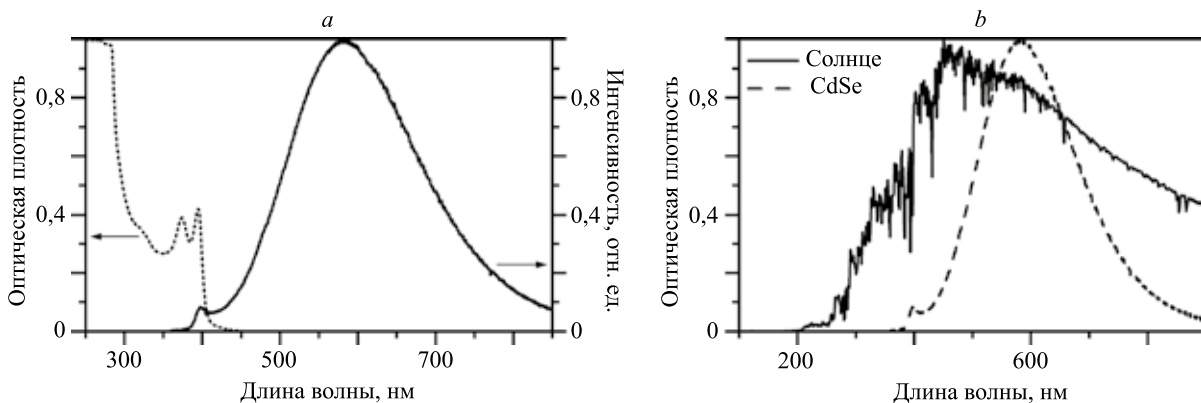


Рис. 1. Спектры поглощения (пунктирная кривая) и фотолюминесценции (сплошная кривая) наносвитков селенида кадмия (CdSe) (*a*); спектры излучения Солнца и фотолюминесценции исследуемых наносвитков CdSe (*b*)

Fig. 1. Absorption (dashed curve) and photoluminescence (solid curve) spectra of CdSe nanoscrolls (*a*); Emission spectrum of the Sun, photoluminescence spectrum of CdSe nanoscrolls (*b*)

вид. Чтобы сравнить нормированное число фотонов, регистрируемых при исследовании межзонной ФЛ, с аналогичным значением для рекомбинационной ФЛ, вычислим интегралы  $S$  от кинетических кривых  $I(t)$  люминесценции наноструктур по времени  $t$ . Расчет интегралов  $S_A$  и  $S_B$  от кинетических кривых  $I_A(t)$  и  $I_B(t)$  ФЛ, соответствующих кривым затухания  $A$  и  $B$ , произведен в пределах от 0 до 100 нс. Отношение  $S_B/S_A$  составило 44,83, где  $S_A = 1,75$ , а  $S_B = 78,46$ .

Видно, что нормированное число фотонов, регистрируемых при исследовании затухания рекомбинационной ФЛ в рассматриваемом временном интервале 0–100 нс, в 45 раз превышает аналогичное значение для межзонной люминесценции при идентичных условиях эксперимента. Такое поведение кривых затухания

характерно для ловушечных уровней коллоидных нанокристаллов [25].

На хроматической диаграмме (рис. 2, *b*) символом  $I$  показаны цветовые координаты, соответствующие спектру ФЛ исследуемых наносвитков CdSe. Спектр ФЛ исследуемых наноструктур (CdSe 2,5 МС) характеризуется излучением в желто-оранжевой области с доминирующей длиной волны  $\lambda^* = 576$  нм и чистотой цвета  $p = 69\%$  (таблица). Невысокая чистота цвета обусловлена наличием широкой полосы рекомбинационной ФЛ, которая охватывает практически весь видимый диапазон (рис. 3). Коррелированная цветовая температура  $T_c$  составила 3506 К, что соответствует теплому белому свету. Рассчитанные цветовые координаты  $(x, y)$ ,  $\lambda^*$ ,  $p$  и  $T_c$ , соответствующие спектрам ФЛ более

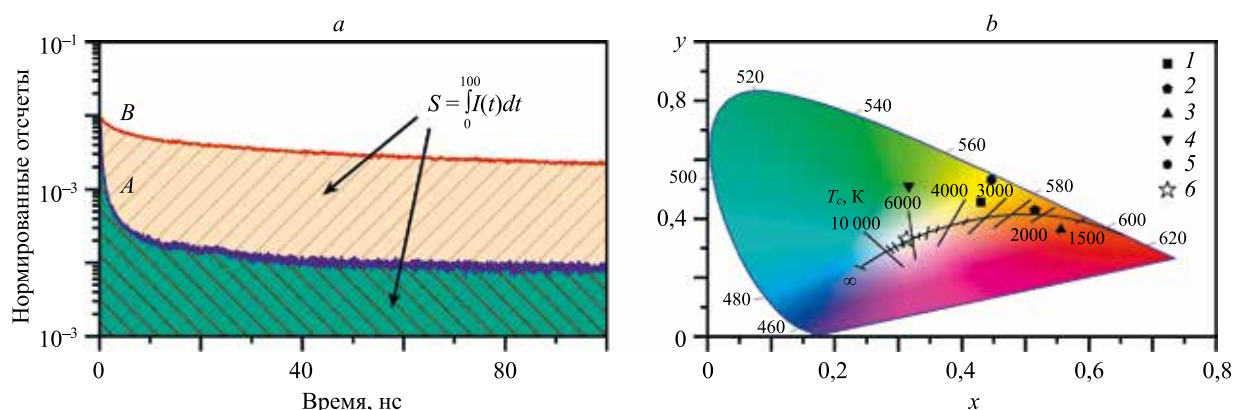


Рис. 2. Кривые затухания фотолюминесценции (ФЛ) наносвитков CdSe.

Кривая  $A$  измерена в максимуме экситонной люминесценции (397 нм), кривая  $B$  — в максимуме полосы, обусловленной поверхностными состояниями (580 нм) (*a*).

Хроматическая диаграмма:  $I$  — ФЛ исследуемых наносвитков CdSe; 2 — ФЛ более толстых наносвитков CdSe из [14]; 3, 4 и 5 — ФЛ нанопластин CdSe из [11]; 6 — стандартное излучение CIE D65 (белый свет). Сплошная линия — линия цветности абсолютно черного тела (кривая Планка);  $T_c$ , К — коррелированная цветовая температура (*b*)

Fig. 2. Photoluminescence (PL) decay curves of CdSe nanoscrolls.

Curve  $A$  is measured at the interband luminescence maximum (397 nm), curve  $B$  is measured at the maximum of the recombination luminescence (580 nm) (*a*).

Chromaticity diagram:  $I$  — PL of CdSe nanoscrolls; 2 — PL of thicker CdSe nanoscrolls from [14]; 3, 4 and 5 — PL of CdSe nanoplatelets from [11]; 6 — standard D65 CIE illuminant (white light); Solid line — Planckian locus;  $T_c$ , K — correlated color temperature (*b*)

Таблица. Оптические и люминесцентные свойства исследованных наноструктур

Table. Optical and luminescence properties of the investigated nanostructures

| Исследуемые наноструктуры | Цветовые координаты в пространстве CIE |      | Доминирующая длина волны $\lambda^*$ , нм | Чистота света $p$ , % | Цветовая температура $T_c$ , К |
|---------------------------|----------------------------------------|------|-------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
|                           | $x$                                    | $y$  |                                           |                       |                                |
| $I$                       | 0,43                                   | 0,46 | 576                                       | 68,9                  | 3506                           |
| 2 [14]                    | 0,52                                   | 0,43 | 586                                       | 84,6                  | 2202                           |
| 3 [11]                    | 0,56                                   | 0,36 | 600                                       | 77,0                  | 1517                           |
| 4 [11]                    | 0,32                                   | 0,51 | 552                                       | 52,8                  | 5859                           |
| 5 [11]                    | 0,45                                   | 0,53 | 571                                       | 94,2                  | 3656                           |

Примечание. Приведены свойства наноструктур:

— для спектров фотолюминесценции ( $I$ ): цветовые координаты в пространстве CIE  $xY(1931)$  г., доминирующая длина волны, чистота света, коррелированная цветовая температура;  
— для нанопластин CdSe (3–5), толщина которых составляет от 3 до 5 МС, цветовые координаты рассчитаны по данным работы [11], а для наносвитков CdSe (2) — по данным [14]

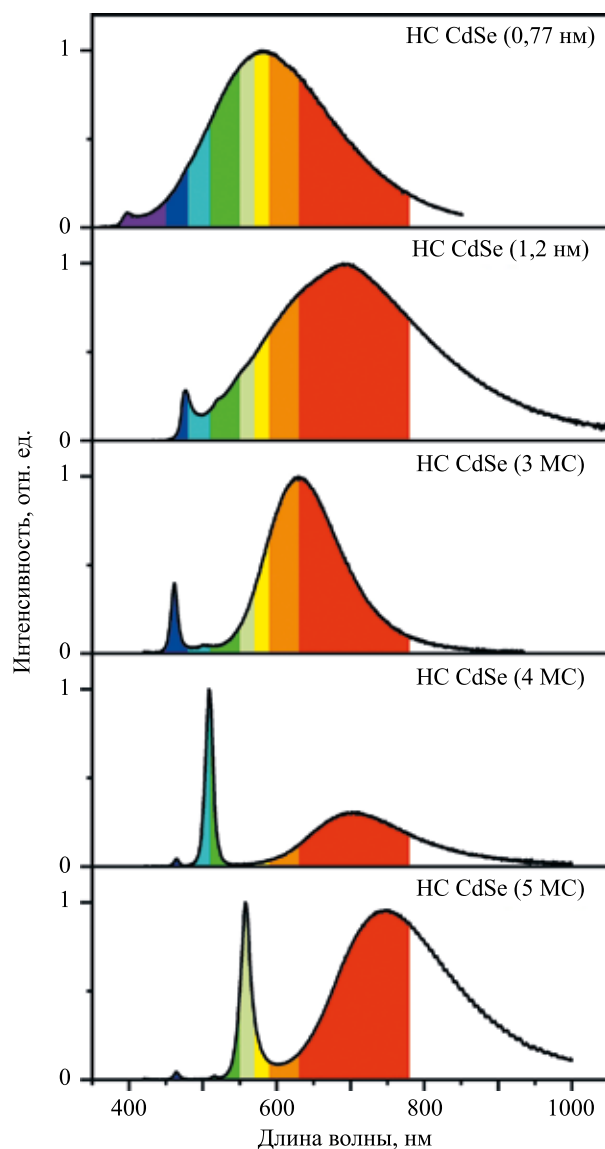


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции планарных и скрученных нанокристаллов CdSe.

Цветом выделены области, соответствующие каждому спектральному диапазону видимого света. Спектры фотолюминесценции нанопластин (НП) толщиной от 3 до 5 МС заимствованы из работы [11], а наносвитков (НС) CdSe — из [14]

Fig. 3. PL spectra of planar and scrolled CdSe nanocrystals. The regions corresponding to each optical range of visible light are highlighted in color. The PL spectra of the nanoplatelets with thickness from 3 to 5 monolayers were borrowed from [11], and the spectrum of CdSe nanoscrolls was taken from [14]

толстых наносвитков 2 и планарных нанокристаллов 3–5 CdSe, приведены в таблице. Для расчета колориметрических характеристик использован источник белого света CIE D65 6.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ нанокристаллов CdSe разной толщины и морфологии. Цветом выделены области, соответствующие каждому спектральному диапазону видимого света. Видно, что в области экситонной ФЛ самых тонких нанопластин доминирует фиолетовый цвет, а в части спектра, соответствующей рекомбинационной ФЛ — красный цвет. Однако смешивание всех спектральных составляющих дает в результате желто-оранжевое свечение, что и отражено на хроматической диаграмме (рис. 2, б).

### Заключение

В работе показано, что в спектре поглощения коллоидных полупроводниковых ультратонких нанопластин селенида кадмия, скрученных в виде свитков, наблюдаются два типа переходов между подзонами легких и тяжелых дырок в валентной зоне и зоной проводимости. Установлено, что излучение исследуемых нанокристаллов в большей степени вызвано рекомбинационной люминесценцией. Нормированное число фотонов, регистрируемых при исследовании кинетической кривой для экситонной компоненты в спектре фотолюминесценции, в 45 раз меньше аналогичного значения для рекомбинационной люминесценции при идентичных условиях эксперимента, что обусловлено тем фактом, что поверхностные состояния препятствуют излучательным переходам, задерживая носителей заряда в ловушках. Из расчетов колориметрических характеристик видно, что излучение, вызванное межзонными переходами, происходит в фиолетовой области спектра, а фотолюминесценция, обусловленная поверхностными состояниями, охватывает практически весь оптический диапазон. Коррелированная цветовая температура  $T_c$  для фотолюминесценции исследованных нанокристаллов селенида кадмия составила 3506 К и приближена к источнику излучения теплого белого света.

## Литература

1. 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 // *Materials Research Express*. 2017. V. 4. N 7. P. 075007. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa7a4f>
2. Кацаба А.В., Федянин В.В., Амброзевич С.А., Витухновский А.Г., Лобанов А.Н., Селюков А.С., Васильев Р.Б., Саматов И.Г., Брунков П.Н. Характеризация дефектов в коллоидных нанокристаллах CdSe модифицированным методом термостимулированной люминесценции // *Физика и техника полупроводников*. 2013. Т. 47. № 10. С. 1339–1343.
3. 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>
4. Reznik R.R., Kotlyar K.P., Shtrom I.V., Samsonenko Yu.B., Khrebtov A.I., Cirlin G.E. Different III–V semiconductor nanowires with quantum dots on silicon: growth by molecular-beam epitaxy and properties // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 6. С. 866–871. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-866-871>
5. Макурин А.А., Колобова Е.В. Исследование спектрально-люминесцентных свойств квантовых точек CsPb(BrCl)<sub>3</sub> во фторфосфатных стеклах // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. Т. 22. № 5. С. 896–902. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-5-896-902>
6. 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 // *Journal of Luminescence*. 2017. V. 186. P. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.02.041>
7. 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 // *Journal of Luminescence*. 2016. V. 179. P. 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.07.016>
8. Mičić O.I., Cheong H.M., Fu H., Zunger A., Sprague J.R., Mascarenhas A., Nozik A.J. Size-dependent spectroscopy of InP quantum dots // *The Journal of Physical Chemistry B*. 1997. V. 101. N 25. P. 4904–4912. <https://doi.org/10.1021/jp9704731>
9. Miller E.M., Kroupa D.M., Zhang J., Schulz P., Marshall A.R., Kahn A., Lany S., Luther J.M., Beard M.C., Perkins C.L., Van De Lagemaat J. Revisiting the valence and conduction band size dependence of PbS quantum dot thin films // *ACS Nano*. 2016. V. 10. N 3. P. 3302–3311. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b06833>
10. de Mello Donega C., Koole R. Size dependence of the spontaneous emission rate and absorption cross section of CdSe and CdTe quantum dots // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2009. V. 113. N 16. P. 6511–6520. <https://doi.org/10.1021/jp811329r>
11. Селюков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Ващенко А.А., Васильев Р.Б., Соколик М.С. Электролюминесценция коллоидных квазидвумерных полупроводниковых наноструктур CdSe в гибридном светоизлучающем диоде // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2015. Т. 147. № 4. С. 687–701.
12. Jin T., Lian T. Trap state mediated triplet energy transfer from CdSe quantum dots to molecular acceptors // *The Journal of Chemical Physics*. 2020. V. 153. N 7. P. 074703. <https://doi.org/10.1063/5.0022061>
13. Yokota H., Okazaki K., Shimura K., Nakayama M., Kim D. Photoluminescence properties of self-assembled monolayers of CdSe and CdSe/ZnS quantum dots // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012. V. 116. N 9. P. 5456–5459. <https://doi.org/10.1021/jp2116609>
14. Васильев Р.Б., Соколик 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.
15. Tessier M.D., Javaux C., Maksimovic I., Loriette V., Dubertret B. Spectroscopy of single CdSe nanoplatelets // *ACS Nano*. 2012. V. 6. N 8. P. 6751–6758. <https://doi.org/10.1021/nn3014855>
16. Saidzhonov B.M., Zaytsev V.B., Berekchiian M.V., Vasiliev R.B. Highly luminescent copper-doped ultrathin CdSe nanoplatelets for white-light generation // *Journal of Luminescence*. 2020. V. 222. P. 117134. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117134>

## References

1. 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. *Materials Research Express*, 2017, vol. 4, no. 7, pp. 075007. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa7a4f>
2. Katsaba A.V., Fedyanin V.V., Ambrozevich S.A., Vitukhnovsky A.G., Lobanov A.N., Selyukov A.S., Vasiliev R.B., Samatov I.G., Brunkov P.N. Characterization of defects in colloidal CdSe nanocrystals by the modified thermostimulated luminescence technique. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 10, pp. 1328–1332. <https://doi.org/10.1134/s1063782613100138>
3. 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>
4. Reznik R.R., Kotlyar K.P., Shtrom I.V., Samsonenko Yu.B., Khrebtov A.I., Cirlin G.E. Different III–V semiconductor nanowires with quantum dots on silicon: growth by molecular-beam epitaxy and properties. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 866–871. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-866-871>
5. Makurin A.A., Kolobkova E.V. Investigation of spectral-luminescent properties of cesium CsPb(BrCl)<sub>3</sub> quantum dots in fluorophosphate glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 896–902. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-5-896-902>
6. 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. *Journal of Luminescence*, 2017, vol. 186, pp. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.02.041>
7. 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. *Journal of Luminescence*, 2016, vol. 179, pp. 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.07.016>
8. Mičić O.I., Cheong H.M., Fu H., Zunger A., Sprague J.R., Mascarenhas A., Nozik A.J. Size-dependent spectroscopy of InP quantum dots. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, vol. 101, no. 25, pp. 4904–4912. <https://doi.org/10.1021/jp9704731>
9. Miller E.M., Kroupa D.M., Zhang J., Schulz P., Marshall A.R., Kahn A., Lany S., Luther J.M., Beard M.C., Perkins C.L., Van De Lagemaat J. Revisiting the valence and conduction band size dependence of PbS quantum dot thin films. *ACS Nano*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 3302–3311. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b06833>
10. de Mello Donega C., Koole R. Size dependence of the spontaneous emission rate and absorption cross section of CdSe and CdTe quantum dots. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, vol. 113, no. 16, pp. 6511–6520. <https://doi.org/10.1021/jp811329r>
11. 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>
12. Jin T., Lian T. Trap state mediated triplet energy transfer from CdSe quantum dots to molecular acceptors. *The Journal of Chemical Physics*, 2020, vol. 153, no. 7, pp. 074703. <https://doi.org/10.1063/5.0022061>
13. Yokota H., Okazaki K., Shimura K., Nakayama M., Kim D. Photoluminescence properties of self-assembled monolayers of CdSe and CdSe/ZnS quantum dots. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, vol. 116, no. 9, pp. 5456–5459. <https://doi.org/10.1021/jp2116609>
14. Vasiliev R.B., Sokolikova M.S., Vitukhnovskii A.G., Ambrozevich S.A., Selyukov A.S., Lebedev V.S. Optics of colloidal quantum-confined CdSe nanoscrolls. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 9, pp. 853–857. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n09ABEH015827>
15. Tessier M.D., Javaux C., Maksimovic I., Loriette V., Dubertret B. Spectroscopy of single CdSe nanoplatelets. *ACS Nano*, 2012, vol. 6, no. 8, pp. 6751–6758. <https://doi.org/10.1021/nn3014855>
16. Saidzhonov B.M., Zaytsev V.B., Berekchiian M.V., Vasiliev R.B. Highly luminescent copper-doped ultrathin CdSe nanoplatelets for

17. Kurtina D.A., Grafova V.P., Vasil'eva I.S., Maksimov S.V., Zaytsev V.B., Vasiliev R.B. Induction of chirality in atomically thin ZnSe and CdSe nanoplatelets: strengthening of circular dichroism via different coordination of cysteine-based ligands on an ultimate thin semiconductor core // *Materials*. 2023. V. 16. N 3. P. 1073. <https://doi.org/10.3390/ma16031073>
18. Kurtina D.A., Garshev A.V., Vasil'eva I.S., Shubin V.V., Gaskov A.M., Vasiliev R.B. Atomically thin population of colloidal CdSe nanoplatelets: growth of rolled-up nanosheets and strong circular dichroism induced by ligand exchange // *Chemistry of Materials*. 2019. V. 31. N 23. P. 9652–9663. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b02927>
19. Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Колориметрия источников излучения: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 126 с.
20. Жбанова В.Л. Система цветопередачи 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>
21. Christodoulou S., Climente J.I., Planelles J., Brescia R., Prato M., Martín-García B., Khan A.H., Moreels I. Chloride-induced thickness control in CdSe nanoplatelets // *Nano Letters*. 2018. V. 18. N 10. P. 6248–6254. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b02361>
22. Ott F.D., Riedinger A., Ochsenbein D.R., Knüsel P.N., Erwin S.C., Mazzotti M., Norris D.J. Ripening of semiconductor nanoplatelets // *Nano Letters*. 2017. V. 17. N 11. P. 6870–6877. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b03191>
23. Biadala L., Liu F., Tessier M.D., Yakovlev D.R., Dubertret B., Bayer M. Recombination dynamics of band edge excitons in quasi-two-dimensional CdSe nanoplatelets // *Nano Letters*. 2014. V. 14. N 3. P. 1134–1139. <https://doi.org/10.1021/nl403311n>
24. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
25. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag<sub>2</sub>S quantum dots // *Journal of Luminescence*. 2020. V. 227. P. 117526. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117526>
- white-light generation. *Journal of Luminescence*, 2020, vol. 222, pp. 117134. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117134>
17. Kurtina D.A., Grafova V.P., Vasil'eva I.S., Maksimov S.V., Zaytsev V.B., Vasiliev R.B. Induction of chirality in atomically thin ZnSe and CdSe nanoplatelets: strengthening of circular dichroism via different coordination of cysteine-based ligands on an ultimate thin semiconductor core. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 1073. <https://doi.org/10.3390/ma16031073>
18. Kurtina D.A., Garshev A.V., Vasil'eva I.S., Shubin V.V., Gaskov A.M., Vasiliev R.B. Atomically thin population of colloidal CdSe nanoplatelets: growth of rolled-up nanosheets and strong circular dichroism induced by ligand exchange. *Chemistry of Materials*, 2019, vol. 31, no. 23, pp. 9652–9663. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b02927>
19. Gorbunova E.V., Chertov A.N. *Colorimetry of Emission Sources*. St. Petersburg, ITMO University, 2015, 126 p. (in Russian)
20. Zhanova 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>
21. Christodoulou S., Climente J.I., Planelles J., Brescia R., Prato M., Martín-García B., Khan A.H., Moreels I. Chloride-induced thickness control in CdSe nanoplatelets. *Nano Letters*, 2018, vol. 18, no. 10, pp. 6248–6254. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b02361>
22. Ott F.D., Riedinger A., Ochsenbein D.R., Knüsel P.N., Erwin S.C., Mazzotti M., Norris D.J. Ripening of semiconductor nanoplatelets. *Nano Letters*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 6870–6877. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b03191>
23. Biadala L., Liu F., Tessier M.D., Yakovlev D.R., Dubertret B., Bayer M. Recombination dynamics of band edge excitons in quasi-two-dimensional CdSe nanoplatelets. *Nano Letters*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 1134–1139. <https://doi.org/10.1021/nl403311n>
24. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 416 p. (in Russian)
25. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag<sub>2</sub>S quantum dots. *Journal of Luminescence*, 2020, vol. 227, pp. 117526. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117526>

**Автор**

**Дайбаге Даниил Саюзович** — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; ассистент, Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация; ассистент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, [daibagya@mail.ru](mailto:daibagya@mail.ru)

**Author**

**Daniil S. Daibagya** — Junior Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Assistant, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation; Assistant, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, [daibagya@mail.ru](mailto:daibagya@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 18.07.2023

Одобрена после рецензирования 05.09.2023

Принята к печати 28.09.2023

Received 18.07.2023

Approved after reviewing 05.09.2023

Accepted 28.09.2023



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»