



## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 535.37

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11099>

## Рекомбинационная и экситонная люминесценция коллоидных квантовых точек PbS, покрытых молекулами тиогликолевой кислоты

И. Г. Гревцева, М. С. Смирнов, К. С. Чирков, О. В. Овчинников✉

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

### Аннотация

В работе представлены результаты исследований закономерностей ИК люминесценции коллоидных квантовых точек PbS, покрытых молекулами тиогликолевой кислоты.

Люминесценция образца записывалась с помощью InGaAs фотоприёмника PDF 10C/M (ThorlabsInc., USA) и дифракционного монохроматора с решёткой  $600 \text{ мм}^{-1}$ . Для исследования температурной зависимости люминесценции образец охлаждали в азотном криостате до температуры 80 К. Обнаружено перераспределение интенсивности люминесценции между двумя пиками (1100 и 1280 нм) при понижении температуры. Показано, что для коротковолнового пика люминесценции в спектре его возбуждения присутствует пик экситонного поглощения, а стоксов сдвиг  $\Delta E_{\text{стокс}} \sim 0.1 \text{ эВ}$ . Напротив, в спектре возбуждения люминесценции длинноволновой полосы отсутствует экситонный пик, а его красная граница смещена в более коротковолновую сторону, что обеспечивает стоксов сдвиг более 0.3 эВ.

Сделан вывод, что коротковолновая полоса люминесценции возникает в результате излучательной аннигиляции экситона, а длинноволновая – рекомбинации носителей заряда на локализованных состояниях. При этом рекомбинационная люминесценция эффективно возбуждается при непосредственном поглощении излучения центром свечения. Предложена трёхуровневая схема, определяющая ИК люминесценцию коллоидных КТ PbS, покрытых молекулами тиогликолевой кислоты.

**Ключевые слова:** квантовые точки сульфида свинца, спектры люминесценции, спектры возбуждения

**Источник финансирования:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00232, <https://rscf.ru/project/22-12-00232/>

**Благодарности:** Результаты просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе Libra 120 были получены на оборудовании Центра Коллективного Пользования ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет».

**Для цитирования:** Гревцева И. Г., Смирнов М. С., Чирков К. С., Овчинников О. В. Рекомбинационная и экситонная люминесценция коллоидных квантовых точек PbS, покрытых молекулами тиогликолевой кислоты. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(2): 181–189. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11099>

**For citation:** Grevtseva I. G., Smirnov M. S., Chirkov K. S., Ovchinnikov O. V. Trap state and exciton luminescence of colloidal PbS quantum dots coated with thioglycolic acid molecules. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(2): 182–189. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11099>

✉ Овчинников Олег Владимирович, e-mail: [ovchinnikov\\_o\\_v@rambler.ru](mailto:ovchinnikov_o_v@rambler.ru)

© Гревцева И. Г., Смирнов М. С., Чирков К. С., Овчинников О. В., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Интерес к полупроводниковым коллоидным квантовым нанокристаллам (квантовым точкам или КТ) определяется широкой сферой их потенциального применения в различных оптоэлектронных устройствах и системах. Полупроводниковые КТ могут применяться в оптических сенсорах, лазерных излучателях, в качестве нелинейных сред для управления интенсивностью, фазой излучения и т. д. [1–4]. Возможность применения КТ в различных устройствах обеспечивается лёгкостью настройки их спектральных и транспортных свойств, благодаря квантово-размерному эффекту.

Необходимым для практического применения КТ является детальное понимание закономерностей фотопроцессов, определяющих размерно-зависимые спектрально-люминесцентные свойства. В случае нестехиометрических соединений фотопроцессы значительно усложняются участием в них локализованных состояний дефектов. PbS является одним из типичных представителей нестехиометрических полупроводников [5]. Повышенный интерес к PbS связан с возможностью его применения в ИК диапазоне, поскольку ширина запрещённой зоны массивного кристалла составляет 0.41 эВ [6] и боровский радиус экситона около 20 нм. Варьирование размеров кристаллов в диапазоне 1–20 нм даёт возможность контролировать полосы поглощения от ИК до видимого диапазона за счёт квантово-размерного эффекта [7–13].

Управление положением пиков люминесценции – отдельная крупная задача. Здесь наряду с изменением энергетической структуры экситонных состояний за счёт вариации размером КТ, также возникает возможность получения новых полос люминесценции, определяющихся оптическими переходами носителей заряда на локализованных состояниях [15–17]. В тоже время установление закономерностей фотопроцессов и механизмов люминесценции для разных типов полупроводниковых КТ требуется в каждом конкретном случае. Для КТ PbS наблюдающиеся экспериментальные закономерности к настоящему моменту времени оказываются весьма противоречивыми [7–13].

В работе [9] для КТ PbS, диспергированных в поливиниловых плёнках, показано, что при росте температуры от 10 до 250 К ширина эффективной запрещённой зоны уменьшается ( $\Delta E_g/\Delta T = -1.1 \cdot 10^{-4}$  эВ/К). Напротив, для массивного PbS с ростом температуры ширина запре-

щённой зоны растёт ( $\Delta E_g/\Delta T = +4.7 \cdot 10^{-4}$  эВ/К) [18]. В спектрах люминесценции КТ сложную полосу на основании температурных зависимостей раскладывали на три пика [9] со стоксовым сдвигом (0.47, 0.25 и 0.17 эВ). Все три пика соотнесли с рекомбинацией носителей заряда на локализованных состояниях. Однако в работах [7, 8, 12, 13, 19] для пиков свечения со стоксовым сдвигом относительно пика экситонного поглощения в диапазоне от 0 до 0.6 эВ предполагается экситонный механизм люминесценции.

В работе [10] для плёнок КТ PbS, покрытых этантиолом, обнаружено два пика люминесценции. На основании данных время-разрешённой спектроскопии наведённого поглощения с фемтосекундным разрешением показан процесс термического освобождения локализованных носителей заряда. При повышении температуры в спектрах наблюдается разгорание коротковолнового пика люминесценции и затухание длинноволнового. Сделано заключение, что коротковолновый пик люминесценции соответствует излучательной аннигиляции экситона, а длинноволновый – рекомбинации на локализованных состояниях.

В работе [20] для КТ PbS сложная полоса люминесценции также была представлена суммой трёх индивидуальных составляющих. На основании анализа данных время-разрешённой люминесценции сделан вывод о том, что коротковолновый пик люминесценции определяется излучательной аннигиляцией экситона. Два других авторы связывают с фононными повторениями, несмотря на сильное различие в кинетике люминесценции всех трёх полос.

Таким образом, имеющиеся экспериментальные данные о закономерностях люминесценции КТ PbS весьма противоречивы.

В данной работе представлены результаты исследований закономерностей люминесценции коллоидных КТ PbS, покрытых молекулами тиогликолевой кислоты (КТ PbS/TGA).

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Методика синтеза

Коллоидные КТ PbS/TGA синтезированы в воде с использованием в качестве пассиватора поверхности КТ молекул тиогликолевой кислоты (TGA). Методика синтеза основана на приёмах, реализованных нами ранее для получения коллоидных растворов КТ сульфидов серебра и кадмия [14, 17]. Процесс синтеза КТ PbS заключался в смешивании 1.5 ммоль  $Pb(NO_3)_2$  с водным раствором тиогликолевой кислоты (3 ммоль) при

pH=9 и постоянном перемешивании. Добавление водного раствора  $\text{Na}_2\text{S}$  (0.85 ммоль) к реакционной смеси приводит к появлению коричневой окраски раствора, что свидетельствует о формировании КТ PbS/TGA. Для удаления побочных продуктов реакции в водный коллоидный раствор КТ PbS вносили ацетон в соотношении объемов 1:1 и центрифугировали с последующим повторным растворением в дистиллированной воде.

## 2.2. Методики экспериментальных исследований

Структурные исследования образца осуществляли методами просвечивающей электронной спектроскопии (ПЭМ) с помощью микроскопа Libra 120 (CarlZeiss, Германия) с цифровым анализом ПЭМ изображений и рентгеновской дифракции. По микрофотографиям ПЭМ устанавливали дисперсию КТ в образце по размерам.

Спектры поглощения регистрировали спектрометром USB2000+ (Ocean optics) с источником излучения USB-DT (Ocean optics). Спектры люминесценции в ИК области записывали с использованием фотоприёмника PDF 10C/M (ThorlabsInc., USA) со встроенным усилителем и дифракционным монохроматором с решёткой  $600 \text{ мм}^{-1}$ . Спектры люминесценции корректировали на спектральную характеристику аппаратуры, измеренную при помощи эталонной воль-

фрамовой лампы накаливания с известной цветовой температурой.

Для получения спектров возбуждения люминесценции использовалась лампа накаливания мощностью 400 Вт и второй монохроматор с решёткой  $1200 \text{ мм}^{-1}$ , что позволяло получить область возбуждения от 500 до 1300 нм.

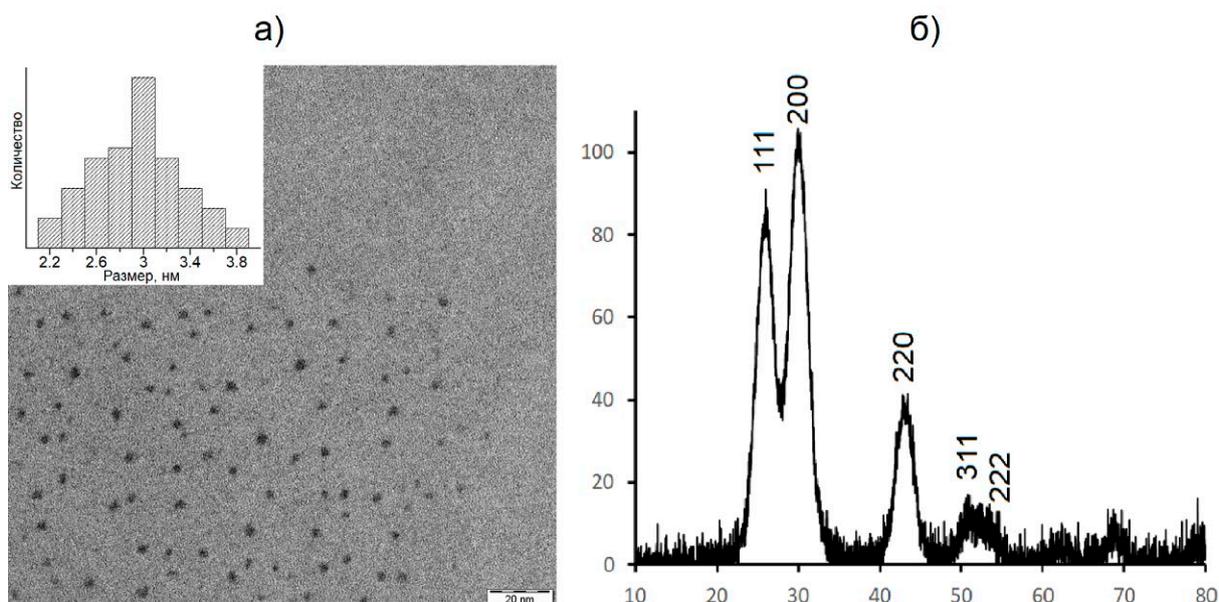
Для регистрации спектра люминесценции исследуемого образца при низких температурах, образец помещался в азотный криостат и охлаждался до 80 К.

## 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1а представлено ПЭМ изображение исследуемых образцов КТ PbS/TGA с гистограммой распределения КТ по размерам. Видно, что предложенная методика синтеза позволяет получить отдельные наночастицы со средним размером около 3 нм. При этом дисперсия по размеру составляет примерно 25-30 %.

На рис. 1б представлена рентгеновская дифракция от образца КТ PbS для излучения  $\text{CuK}_\alpha$  с длиной  $1.056 \text{ \AA}$ , демонстрирующая присутствие хорошо различимых рефлексов при  $25.9^\circ$ ,  $30.1^\circ$ ,  $43.05^\circ$ , соответствующих кубической модификации кристалла PbS. Все рефлексы оказались заметно уширенными. Оценка размера кристаллитов с помощью формулы Шерера:

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$



**Рис. 1.** ПЭМ изображение КТ PbS/TGA с гистограммой распределения по размерам (а). Рентгеновская дифракция от образца (б)

где  $d$  – размер в нм,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения 0.15405 нм,  $\beta$  – ширина пика дифракции на половине высоты (использовали пик (220), поскольку он не перекрывается с другими рефлексами),  $\theta$  – угол Брэгга, дала величину порядка 3–3.5 нм, что хорошо соотносится с данными ПЭМ. Таким образом, синтезированный образец представляет собой набор нанокристаллов PbS средним размером около 3 нм.

На рис. 2 представлен спектр оптического поглощения КТ PbS/TGA. Край спектра поглощения, расположенный в области около 1000 нм, оказался сдвинутым в коротковолновую сторону относительно края поглощения массивного PbS (0.41 эВ или 3025 нм), что указывает на квантовое ограничение носителей заряда. В спектре поглощения отсутствует экситонная структура, что свойственно КТ из полупроводников с высокой степенью нестехиометрии [14]. В таком случае форма спектра поглощения определяется не только переходами между квантово-размерными состояниями нанокристалла, но и переходами с участием локализованных состояний. Кроме того, значительный вклад в отсутствие экситонной структуры также определяется и заметной дисперсией КТ в образце по размеру.

При возбуждении излучением с длиной волны 462 нм возникает интенсивная ИК люминес-

ценция, спектр которой представлен на рис. 2. Спектр люминесценции не элементарен, в нем присутствуют как минимум два пика. Коротковолновый пик с максимумом около 1100 нм и длинноволновый – 1280 нм. Оценочно полуширина обоих пиков люминесценции заключена в пределах 0.1–0.2 эВ. Как правило, узкие пики люминесценции для КТ относят к излучательной аннигиляции экситона, однако для некоторых полупроводниковых соединений даже в случае рекомбинационного свечения также наблюдают пики люминесценции с полушириной, не превышающей 0.2 эВ [14]. В нашем случае отсутствие экситонной структуры в спектре поглощения не позволяет установить величину стока сдвига для обнаруженных пиков люминесценции. Для установления механизмов свечения рассмотрим спектры возбуждения люминесценции.

В отличие от спектров поглощения, которые определяются поглощением каждого нанокристалла в образце, в формировании спектров возбуждения участвуют только те КТ, которые излучают на длине волны регистрации свечения. Это позволяет, изменяя длину волны регистрации свечения, в спектрах возбуждения люминесценции добиться селективности по длинам волн.

На рис. 3 представлены спектры возбуждения люминесценции, записанные в максимумах наблюдаемых полос. Узкие интенсивные пики в

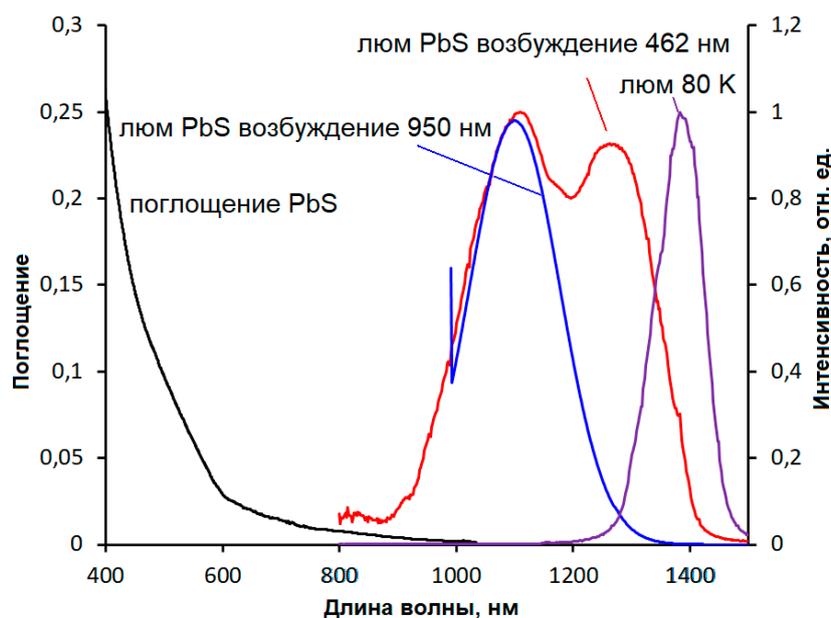
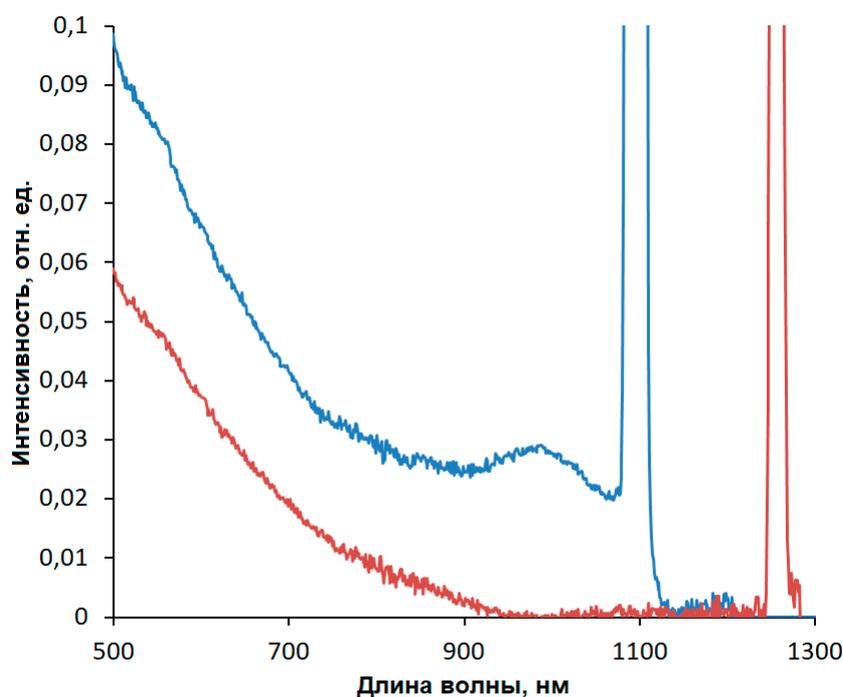


Рис. 2. Спектры поглощения и люминесценции коллоидных растворов КТ PbS/TGA в кварцевой кювете



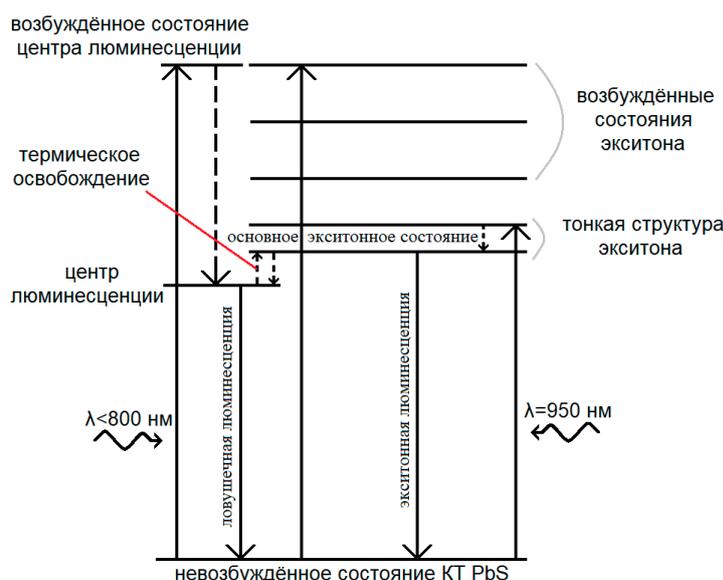
**Рис. 3.** Спектры возбуждения люминесценции

области 1100 и 1280 нм с полушириной порядка 15 нм, связаны с рассеянием возбуждающего излучения, когда его длина волны совпадает с длиной волны регистрации свечения. В спектре возбуждения люминесценции в коротковолновой полосе (1100 нм) наблюдается особенность с пиком при 990 нм. Положение и форма этого пика позволяет его связать с поглощением в основное состояние экситона. В таком случае стоксов сдвиг пика люминесценции относительно пика экситонного поглощения составляет величину 0.125 эВ. Эта величина характерна для экситонной люминесценции КТ PbS со средним размером около 3–3.5 нм. Напротив, в спектре возбуждения люминесценции в пике при 1280 нм экситонная структура не обнаруживается. При этом край полосы возбуждения расположен в области 950 нм, а величина стоксова сдвига возрастает до 0.33 эВ. Это позволяет связать длинноволновую полосу люминесценции с излучательной рекомбинацией носителей заряда на локализованных состояниях. Здесь необходимо отметить, что возбуждение рекомбинационной полосы из пика экситонного поглощения оказывается малоэффективным (в спектре возбуждения отсутствует экситонный пик поглощения). Действительно, при возбуждении излучением с длиной волны 950 нм интенсивность длинноволновой полосы значительно меньше, чем коротковол-

новой (рис. 2). Сильное поглощение локализованными состояниями по сравнению с собственным экситонным поглощением для КТ PbS также показано в работе [10].

Если предложенные механизмы люминесценции коллоидных КТ PbS/TGA (рекомбинационная и экситонная полосы) верны, и оба пика люминесценции принадлежат каждой КТ в образце, а не отдельным нанокристаллам, то между интенсивностью полос люминесценции должна существовать некоторая связь. Это действительно так. При охлаждении образца коллоидных КТ PbS/TGA до 80 К полоса люминесценции с максимумом при 1100 нм исчезает, а свечение в длинноволновой полосе становится более интенсивным (рис. 2). Пик длинноволновой люминесценции по мере охлаждения постепенно смещается в длинноволновую сторону от 1280 к 1380 нм, т. е. на 0.07 эВ.

Зависимость относительной интенсивности полос люминесценции от температуры указывает на принадлежность обеих полос каждому нанокристаллу в образце и позволяет сформулировать схему энергетических уровней и переходов между ними (рис. 4). Схема содержит невозбужденное и несколько возбужденных состояний экситона, определяющиеся основным и возбужденным состоянием электрона и дырки на квантово-размерных уровнях нанокристал-



**Рис. 4.** Схема энергетических переходов в КТ PbS/TGA

ла. Также есть несколько уровней возбуждённого состояния центра рекомбинационной люминесценции.

Наблюдение в спектре люминесценции при комнатной температуре двух пиков объясняется тем, что при возбуждении КТ излучением с длиной волны 462 нм преимущественно происходит захват носителей заряда на возбуждённое состояние ловушки. Впоследствии носители заряда могут переходить на экситонный уровень в результате термической активации. Таким образом, носители заряда могут рекомбинировать как с ловушечного, так и с экситонного уровней. Термическая активация перехода на экситонный уровень также объясняет отсутствие экситонного пика в спектре при охлаждении образца до температуры 80 К. При возбуждении КТ излучением с длиной волны 950 нм происходит прямое возбуждение экситона. Захват носителей заряда на центр рекомбинационной люминесценции в таком случае является менее эффективным, чем излучательная аннигиляция экситона, что и объясняет ослабление пика, ассоциированного с люминесценцией от ловушки. Термическое возбуждение носителей заряда с центра люминесценции до экситонного состояния способствует росту заселённости последнего и разгоранию экситонной люминесценции при повышении температуры. Возбуждение экситонного состояния с наименьшей энергией (длина волны около 950 нм), по-видимому, соответствует нерезонансному низкоэффективному возбуждению центра свечения. При

этом процесс захвата носителей заряда из экситонного состояния на центр люминесценции является также медленным процессом. Низкая скорость захвата способствует доминированию экситонной люминесценции при непосредственном возбуждении излучением с длиной волны 950 нм, приходящемся на область экситонного пика поглощения (рис. 2).

Таким образом, обнаруженная для КТ PbS/TGA интенсивная ИК люминесценция в двух полосах – при 1100 нм соответствует излучательной аннигиляции экситона, а при 1280 нм – рекомбинации на локализованных состояниях.

#### 4. Заключение

В работе представлены новые закономерности в ИК люминесценции коллоидных квантовых точек сульфида свинца, покрытых молекулами тиогликолевой кислоты. Обнаружено два пика люминесценции с максимумами при 1100 нм и 1280 нм. Снижение температуры до 80 К сопровождалось уменьшением интенсивности люминесценции в коротковолновой полосе и одновременным ростом интенсивности длинноволнового пика люминесценции. Кроме того, в спектрах возбуждения фотолюминесценции для двух пиков обнаружены принципиальные отличия. В спектре возбуждения коротковолнового пика люминесценции присутствует экситонная структура, а стоков сдвиг составляет величину около 0.1 эВ. Напротив, для длинноволнового пика люминесценции экситонная структура в спектре возбуждения не обнаруже-

на, а стоксов сдвиг пика люминесценции относительно длинноволнового края спектра возбуждения составил величину около 0.3 эВ. Сделан вывод, что природа коротковолнового пика (1100 нм) связана с излучательной аннигиляцией экситона, а длинноволновый пик возникает в результате рекомбинации носителей заряда на локализованных состояниях. Сформулирована эмпирическая схема фотопроцессов, учитывающая термическое перераспределение заселённости экситонного состояния и центра рекомбинационной люминесценции, а также особенности прямого возбуждения рекомбинационной люминесценции.

### Заявленный вклад авторов

Гревцева И. Г. – развитие методологии, написание и редактирование текста; Овчинников О. В. – научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, итоговые выводы; Смирнов М. С. – концепция исследования, проведение исследования, написание обзора и редактирование текста; Чирков К. С. – проведение исследования, написание обзора

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

1. Shehab M., Ebrahim S., Soliman M. Graphene quantum dots prepared from glucose as optical sensor for glucose. *Journal of Luminescence*. 2017;184: 110–116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.12.006>
2. Chen F., Lin Q., Shen H., Tang A. Blue quantum dot-based electroluminescent light-emitting diodes. *Materials Chemistry Frontiers*. 2020;4: 1340–1365. <https://doi.org/10.1039/D0QM00029A>
3. Bai Z., Ji W., Han D., Chen L., ... Zhong H. Hydroxyl-terminated CuInS<sub>2</sub> based quantum dots: toward efficient and bright light emitting diodes. *Chemistry of Materials*. 2016;28(4): 1085–1091. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04480>
4. Peng Y., Wang G., Yuan C., He J., Ye S., Luo X. Influences of oxygen vacancies on the enhanced nonlinear optical properties of confined ZnO quantum dots. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;739: 345–352 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.250>
5. Sadovnikov S. I., Rempel A. A. Nonstoichiometric distribution of sulfur atoms in lead sulfide structure. *Doklady Physical Chemistry*. 2009;428(1): 167–171. <https://doi.org/10.1134/S0012501609090024>

6. Scanlon W. W. Recent advances in the optical and electronic properties of PbS, PbSe, PbTe and their alloys. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1959;8: 423–428. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90379-8](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90379-8)

7. Warner J. H., Thomsen E., Watt A. R., Heckenberg N. R., Rubinsztein-Dunlop H. Time-resolved photoluminescence spectroscopy of ligand-capped PbS nanocrystals. *Nanotechnology*. 2005;16: 175–179. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/2/001>

8. Torres-Gomez N., Garcia-Gutierrez D. F., Lara-Canche A. R., Triana-Cruz L., Arizpe-Zapata J. A., Garcia-Gutierrez D. I. Absorption and emission in the visible range by ultra-small PbS quantum dots in the strong quantum confinement regime with S-terminated surfaces capped with diphenylphosphine. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;860: 158443–158454. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158443>

9. Kim D., Kuwabara T., Nakayama M. Photoluminescence properties related to localized states in colloidal PbS quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2006;119–120: 214–218. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2005.12.033>

10. Gilmore R. H., Liu Y., Shcherbakov-Wu W., ... Tisdale W. A. Epitaxial dimers and auger-assisted Detrapping in PbS Quantum Dot Solids. *Matter*. 2019;1(1): 250–265. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.05.015>

11. Nakashima S., Hoshino A., Cai J., Mukai K. Thiol-stabilized PbS quantum dots with stable luminescence in the infrared spectral range. *Journal of Crystal Growth*. 2013;378: 542–545. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.11.024>

12. Loiko P. A., Rachkovskaya G. E., Zacharevich G. B., Yumashev K. V. Wavelength-tunable absorption and luminescence of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-NaF glasses with PbS quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2013;143: 418–422. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2013.05.057>

13. Kolobkova E., Lipatova Z., Abdrshin A., Nikonov N. Luminescent properties of fluorine phosphate glasses doped with PbSe and PbS quantum dots. *Optical Materials*. 2017;65: 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.09.033>

14. Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag<sub>2</sub>S quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2020;227: 117526. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117526>

15. Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V. Luminescence decay characteristics of CdS quantum dots doped with europium ions. *Journal of Luminescence*. 2019;213: 459–468. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.05.046>

16. Kondratenko T. S., Zvyagin A. I., Smirnov M. S., Perepelitsa A. S., Ovchinnikov O. V. Luminescence and nonlinear optical properties of colloidal Ag<sub>2</sub>S quantum

dots. *Journal of Luminescence*. 2019;208: 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.12.042>

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

18. Dalven R. Electronic structure of PbS, PbSe, and PbTe. *Solid State Physics*. 1974;28: 179–224. [https://doi.org/10.1016/S0081-1947\(08\)60203-9](https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60203-9)

19. Yin Q., Zhang W., Zhou Y., Wang R., Zhao Z., Liu C. High efficiency luminescence from PbS quantum dots embedded glasses for near-infrared light emitting diodes. *Journal of Luminescence*. 2022;250: 119065 <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119065>

20. Yue F., Tomm J. W., Kruschke D. Experimental observation of exciton splitting and relaxation dynamics from PbS quantum dots in a glass matrix. *Physical Review B*. 2014;89: 081303(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.081303>

## Информация об авторах

*Гревцева Ирина Геннадьевна*, к. ф.-м. н., преподаватель кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1964-1233>

[grevtseva\\_ig@inbox.ru](mailto:grevtseva_ig@inbox.ru)

*Смирнов Михаил Сергеевич*, д. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8765-0986>

[smirnov\\_m\\_s@mail.ru](mailto:smirnov_m_s@mail.ru)

*Чирков Кирилл Сергеевич*, аспирант кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0387-0733>

[kirill200598@mail.ru](mailto:kirill200598@mail.ru)

*Овчинников Олег Владимирович*, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6032-9295>

[ovchinnikov\\_o\\_v@rambler.ru](mailto:ovchinnikov_o_v@rambler.ru)

*Поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 29.09.2022; принята к публикации 15.11.2022; опубликована онлайн 25.06.2023.*