

УДК 621.383
EDN: LOTWHX

PACS: 85.60.–q

Зависимость затухания фотосигнала в фоторезисторах на основе массивов коллоидных квантовых точек HgTe от условий их получения© В. О. Яковлев¹, Т. В. Королева¹, К. Т. Хакимов¹, О. А. Сапцова¹, А. А. Короннов¹,
О. В. Вершинина¹, А. Г. Медведев¹, В. П. Пономаренко^{1,2}, В. С. Попов^{1,2*}¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия² АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: popov.vs@mipt.ru

Статья поступила в редакцию 25.12.2025; после доработки 3.03.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

В данной работе исследовано влияние условий синтеза коллоидных квантовых точек на количество и типы поверхностных состояний, которые, в свою очередь, определяют быстродействие фотосенсоров на их основе. Показано, что замена этандитиола на β-меркаптоэтанол позволяет повысить быстродействие фоторезисторов на основе ККТ HgTe на три порядка.

Ключевые слова: фотосенсор, коллоидные квантовые точки, ККТ, поверхностные состояния, теллурид ртути.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-28-34

Введение

Фотосенсорика на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) является одним из наиболее динамично развивающихся направлений инфракрасной фотоэлектроники [1, 2]. Фоточувствительные элементы резистивного и барьерного типов на основе коллоидных квантовых точек используются как для одиночных фоточувствительных элементов, так и при формировании матричных фотоприемных устройств коротковолнового и средневолнового ИК диапазона [3]. В основе чувствительных слоев в таких фотосенсорах применяются консолидированные слои, изготовленные жидкостными методами из золь нанокристаллов полупроводников, преимущественно сульфида свинца и теллурида ртути. При таком подходе перенос носителей в получаемых поликристаллических наноструктурированных слоях протекает преимущественно по прыжковому механизму. Поверхность нано-

кристаллов в слоях, сформированных химическими методами, содержит большое число различных функциональных групп и не скомпенсированных связей, приводящих к возникновению поверхностных состояний. Вопросы быстродействия в фотосенсорах на основе ККТ занимают важное место в связи с большой поверхностью квантово-размерных материалов и более сложно контролируемой средой, окружающей нанокристаллы в ходе формирования консолидированных пленок. Исследование влияния поверхностных состояний на чувствительность и быстродействие фотосенсоров при направленной модификации поверхности ККТ и их слоев имеет большое значение для разработки способов формирования фоточувствительных слоев. Представленные в литературе результаты исследований влияния ловушек в основном сосредоточены на исследовании кривых затухания фоторезисторов [4, 5], фотолюминесценции [6, 7] или спектроскопии накачки-

зондирования («pump-probe») [8] при варьировании лигандов в слоях ККТ PbS, при этом другим ККТ внимание в должном объеме не уделялось, а вопросы влияния условий синтеза самих нанокристаллов в литературе не рассматривались.

Целью настоящей работы являлось исследование изменения поверхностных состояний при варьировании методов синтеза ККТ и постсинтетической обработки поверхности ККТ HgTe путем изучения кривых затухания фотосигнала в фоторезисторах на основе ККТ HgTe.

1. Синтез ККТ на основе HgTe и изготовление слоев на их основе

Синтез ККТ HgTe

Синтез ККТ HgTe осуществляли согласно опубликованной методике [9] с использованием в качестве прекурсора ртути комплексного соединения $\text{NH}_4[\text{HgCl}_2(\text{SCN})]$.

Фоторезистивные структуры изготавливали в два этапа. Первый этап – активация подложки, второй этап – последовательное послойное формирование фоторезистивной структуры. Оба этапа предполагают использование в качестве активатора и замены лигандов один и тот же раствор: раствор этандитиола (EDT) в соляной кислоте и изопропанол HCl:EDT:IPA (1:1:20 по об.) либо раствор β -меркаптоэтанола (β -МЕ) в соляной кислоте и изопропанол $\text{HCl}:\beta\text{-МЕ:IPA}$ (1:1:20 по об.).

Методы

ИК-Фурье спектры были получены на ИК-Фурье спектрометре Spectrum 100 (Perkin-Elmer, США) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО). Снимки высокого разрешения были получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа Microscope JEM-2100 (JEOL, Япония).

2. Методика исследования кривых затухания фотосигнала

Исследование процессов спада фототока является одним из классических инструментов исследования поверхностных состояний в фо-

топроводящих слоях полупроводников [9]. В зависимости от вида ловушки и создаваемого ею энергетического уровня удерживаемые носители через какое-то время возвращаются в валентную зону или в зону проводимости.

Поскольку фототок пропорционален количеству носителей заряда [10], то выражение для спада фототока от времени будет описываться выражением [11]:

$$I_{\phi} = I_{\phi 0} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $I_{\phi 0}$ – значение фототока при насыщении, τ – время жизни носителей.

Для анализа многостадийной релаксации используется разделение сигнала по амплитуде фототока. Пороговое значение определяется как:

$$I_{\text{thr}} = I_{\text{min}} + \gamma(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}),$$

где I_{min} и I_{max} – минимальное и максимальное значения фототока в выбранном интервале.

Коэффициент γ задаёт относительное положение порогового уровня в полном динамическом диапазоне фототока и тем самым определяет границу между различными стадиями релаксационного процесса. В используемой методике значение γ выбирается в виде:

$$\gamma = \frac{1}{e^n},$$

где e – основание натуральных логарифмов, а показатель степени n является целым или дробным числом, задаваемым пользователем в зависимости от предполагаемого числа и выраженности релаксационных компонент. При $n = 1$ порог соответствует уровню $1/e$ от полного амплитудного диапазона, что является характерным значением для одноэкспоненциального затухания и естественным образом связано с определением постоянной времени. При увеличении показателя степени пороговое значение последовательно смещается в область меньших токов, что позволяет выделять более медленные стадии релаксации.

Такой способ задания порогов обеспечивает физически обоснованное разбиение сигнала на участки, каждый из которых соответствует определённому диапазону времен и,

соответственно, доминирующему релаксационному механизму. В результате каждый выделенный участок может анализироваться независимо с использованием собственной экспоненциальной аппроксимации, что повышает точность определения постоянных времени и амплитуд отдельных компонент и снижает взаимное влияние быстрых и медленных процессов при совместной обработке всего сигнала.

Для снижения влияния шумов и одиночных выбросов применяется медианное сглаживание. При этом допускается комбинированный режим, при котором начальный участок временного ряда сохраняется без фильтрации, а последующая часть подвергается сглаживанию. Это позволяет сохранить быстрые начальные изменения фототока и одновременно повысить устойчивость анализа медленной релаксационной области.

Аппроксимация релаксационной части фотоотклика проводится с использованием модели суммы затухающих экспоненциальных компонент. В общем виде модель записывается как

$$I_{\text{model}}(t) = I_{\text{T}} + \sum_{k=1}^N A_k \exp\left(-\frac{t-t_s}{\tau_k}\right),$$

где I_{T} – темновой ток, A_k – амплитуды отдельных релаксационных компонент, τ_k – соответствующие им постоянные времена, N – число экспоненциальных слагаемых, а t_s – эффективный сдвиг начала релаксации по времени. При этом предполагается, что $A_k \geq 0$, что обеспечивает физически осмысленную интерпретацию результатов.

Результатом обработки являются численные значения τ для каждого из участков кривой затухания фототока, а также набор временных зависимостей, включающий исходный сигнал и аппроксимирующие кривые.

3. Обсуждение результатов

В работе синтезированы коллоидные квантовые точки HgTe, имеющие экситонный пик поглощения в диапазоне от 2,13 до 3,16 мкм (рис. 1).

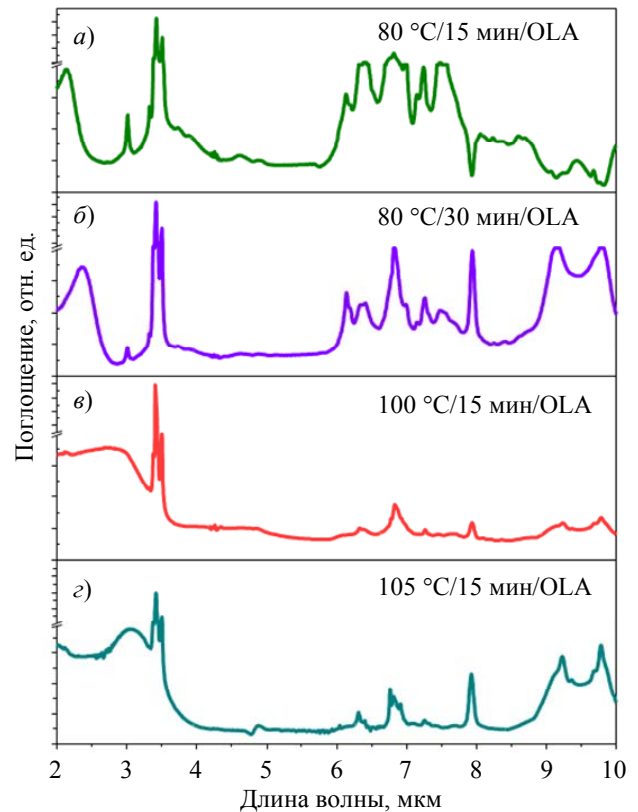


Рис. 1. ИК-Фурье спектры поглощения ККТ, HgTe синтезированных при различных режимах (OLA-олеиламин)

По данным просвечивающей электронной микроскопии во всех случаях синтезированы нанокристаллы HgTe (рис. 2). Слои на основе ККТ HgTe имели толщину около 80–90 нм согласно данным атомно-силовой микроскопии.

Исследование кривых затухания показало, что в зависимости от условий синтеза коллоидных квантовых точек и типа лиганда, используемого для модификации поверхности фоточувствительных слоев, изменяется число и типы поверхностных состояний (рис. 3).

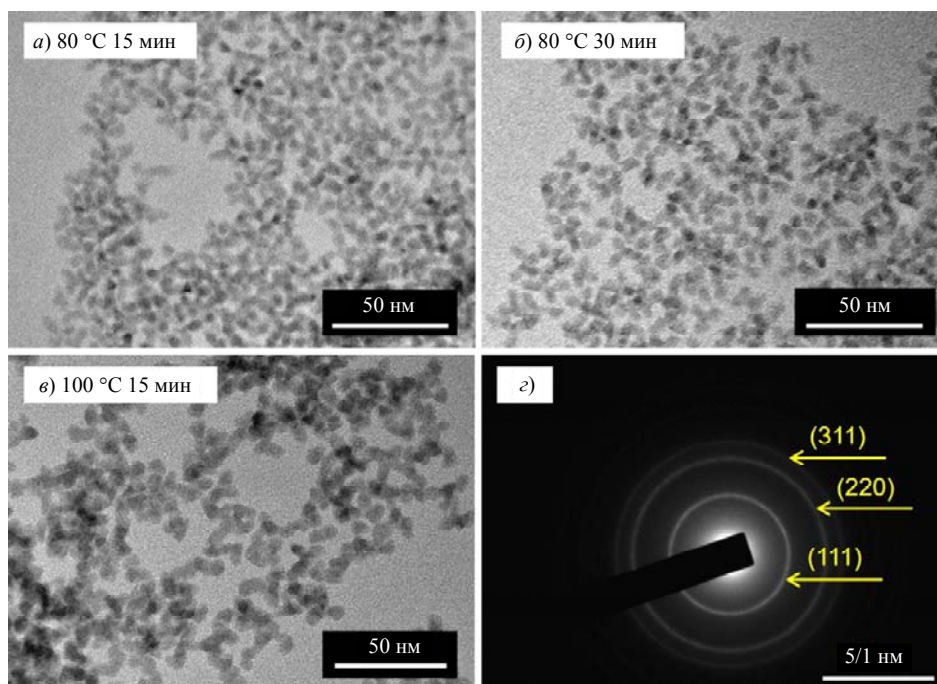


Рис. 2. (а–в) Просвечивающая электронная микроскопия ККТ HgTe полученных при различных условиях, (г) дифракция электронов на выделенной области

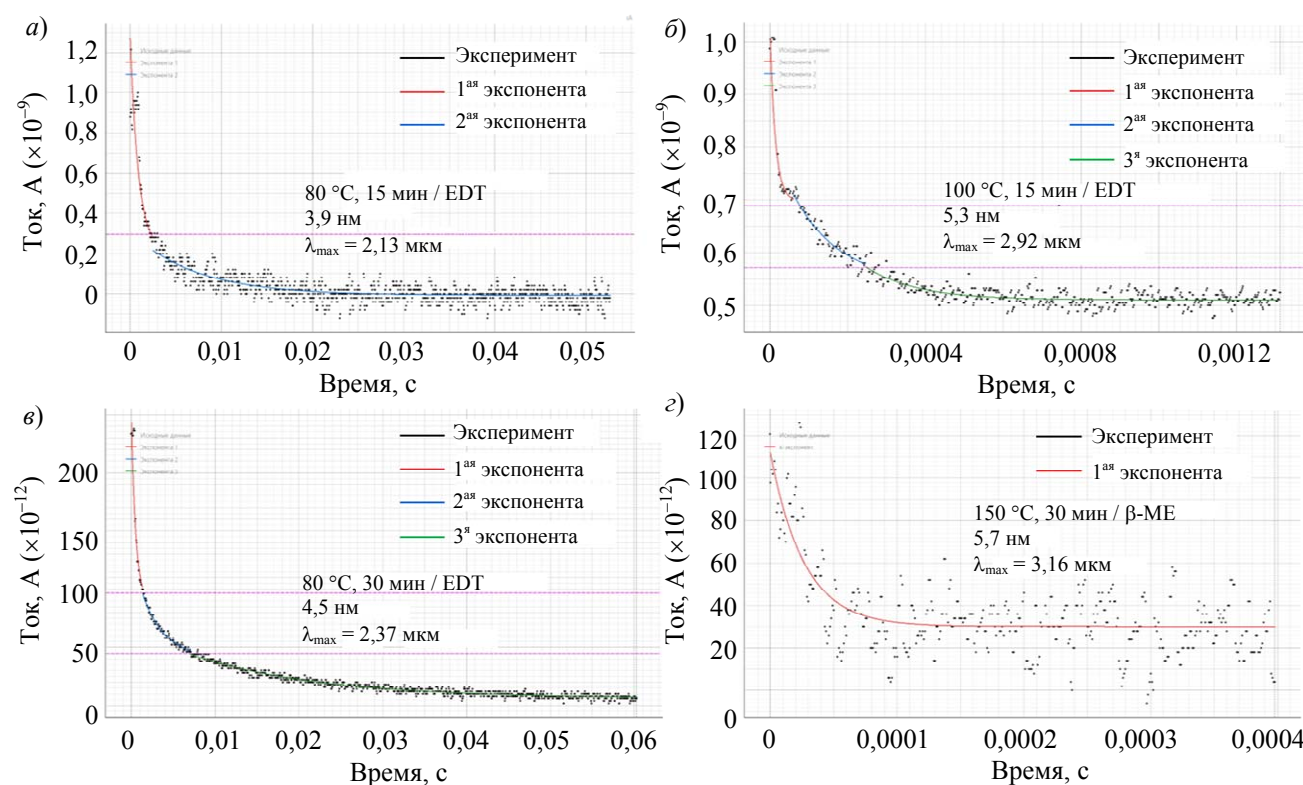


Рис. 3. Кривые затухания фотосигналов фоторезисторов на основе ККТ HgTe, полученных при различных условиях (температура и время синтеза: а) 80 °С, 15 мин, б) 100 °С, 15 мин, в) 80 °С, 30 мин) и с использованием различных лигандов при модификации поверхности б) этандитиол (EDT) и г) β-меркаптоэтанол (β-ME)

Поскольку время жизни характеризует энергию поверхностного состояния, а именно большему времени жизни соответствуют более глубокие ловушки [12], можно заключить,

что в зависимости от размера квантовой точки и используемого лиганда на её поверхности присутствуют поверхностные состояния, существенно отличающиеся по энергии.

Для ККТ HgTe с последующей заменой на этандитиол при изменении размера ККТ от 3,9 нм к 4,5 нм сохраняются поверхностные состояния, характеризующиеся $\tau \sim 0,0002$ с и $\tau \sim 0,003$ с, при этом добавляется новый тип поверхностных состояний с $\tau \sim 0,02$ с. При изменении размера ККТ от 4,5 нм до 5,3 нм сохраняются только поверхностные состояния, характеризующиеся $\tau \sim 0,02$ с, вместе с

тем появляются новые поверхностные состояния с $\tau \sim 0,08$ с и $\tau \sim 0,003$ с (рис. 4).

Использование в качестве лигандной замены β -меркаптоэтанола вместо этандитиола при близких размерах квантовых точек (5,3 и 5,7 нм) кардинально меняет поверхностные состояния: вместо состояний трех типов с $\tau \sim 0,02$ с, $\tau \sim 0,08$ с и $\tau \sim 0,003$ с, наблюдается лишь один тип с $\tau \sim 0,00001$ с (рис. 4).

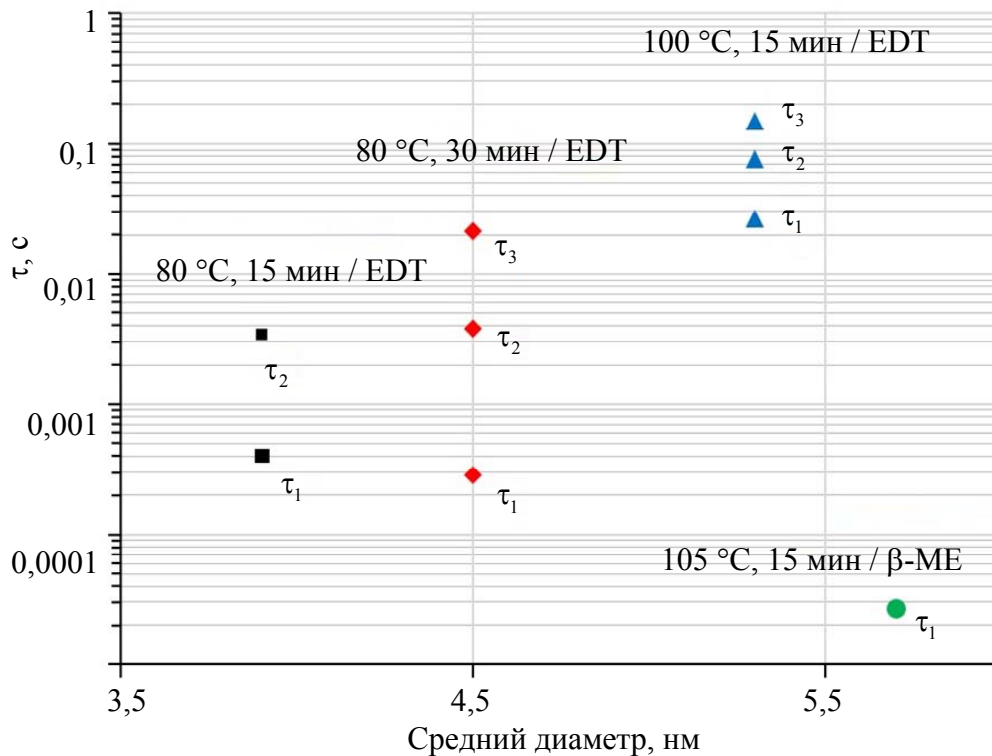


Рис. 4. Значения τ , полученные при обработке кривых затухания фотосигналов фоторезисторов на основе ККТ HgTe полученных при различных условиях (температура и время синтеза: а) 80 °C, 15 мин, б) 100 °C, 15 мин, в) 80 °C, 30 мин) и с использованием различных лигандов при модификации поверхности б) этандитиол (EDT) и г) β -меркаптоэтанол (β -МЕ)

Заключение

В ходе анализа кривых затухания фототклика фоторезисторов на основе ККТ HgTe полученных при варьировании параметров синтеза и отличающихся размером нанокристаллов показано существование поверхностных состояний разных типов. Использование в качестве лигандной замены β -меркаптоэтанола позволяет снизить число поверхностных состояний с трех типов до одного, при этом характеризующегося наименьшим из обнаруженных в данной работе временем жизни, равным 10 мкс, обеспечивающим высокое быстродействие фотосенсора.

Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации
(проект № FSMG-2025-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 45–53.
2. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. / Успехи химии. 2024. Т. 93. № 4. С. RCR5113.
3. Попов В. С., Пономаренко В. П., Дирочка А. И., Попов С. В. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 54–61.

4. Konstantatos G., Sargent E. H. / Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. № 17. P. 1–4.
5. Gong W., Wang P., Deng W., Zhang X., An B., Li J., Sun Z., Dai D., Liu Z., Li J., Zhang Y. / ACS Appl. Mater. Interfaces. 2022. Vol. 14. № 22. P. 25812–25823.
6. Xia Y., Chen W., Zhang P., Liu S., Wang K., Yang X., Tang H., Lian L., He J., Liu X., Liang G., Tan M., Gao L., Liu H., Song H., Zhang D., Gao J., Wang K., Lan X., Zhang X., Müller-Buschbaum P., Tang J., Zhang J. / Adv. Funct. Mater. 2020. Vol. 30. № 22. P. 2000594.
7. Liu X., Fu T., Liu J., Wang Y., Jia Y., Wang C., Li X., Zhang X., Liu Y. / ACS Appl. Mater. Interfaces. 2022. Vol. 14. № 12. P. 14274–14283.
8. Bakulin A. A., Neutzner S., Bakker H. J., Ottaviani L., Barakel D., Chen Z. / ACS Nano. 2013. Vol. 7. № 10. P. 8771–8779.
9. Koroleva T.V., Medvedev A.G., Khakimov K.T., Yakovlev V.O., Saptsova O.A., Koronov A.A., Chemakina Y.A., Asnachev D.D., Vershinina O.V., Ponomarenko V.P., Popov V.S. / Optical Materials. 2026. Vol. 175. P. 118029.
10. Бьюб П. Фотопроводимость твердых тел. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962.
11. Le B. Q., Van T. N., Quang D. T., Le Dinh V., Van T. P., Kim N. C. T. / J. Semicond. 2025. Vol. 46. № 7. P. 072101.
12. Konstantatos G., Levina L., Fischer A., Sargent E. H. / Nano Lett. 2008. Vol. 8. № 5. P. 1446–1450.

PACS: 85.60.–q

Influence of the HgTe colloidal quantum dots layers obtaining conditions on the photosignal decay in photoresistors

V. O. Yakovlev¹, T. V. Koroleva¹, K. T. Khakimov¹, O. A. Saptsova¹, A. A. Koronov¹,
O. V. Vershinina¹, A. G. Medvedev¹, V. P. Ponomarenko^{1,2}, and V. S. Popov^{1,2*}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia*

² *RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia*

* *E-mail: popov.vs@mipt.ru*

Received 25.12.2025; revised 3.03.2026; accepted 27.04.2026

This paper examines the influence of colloidal quantum dot synthesis conditions on the number and types of surface states, which in turn determine the response time of photosensors based on them. It is shown that replacing ethanedithiol with β -mercaptoethanol improves the response time of HgTe CQD-based photoresistors by three orders of magnitude.

Keywords: photosensor, colloidal quantum dots, CQDs, surface states, mercury telluride.

REFERENCES

1. Popov V. S., Ponomarenko V. P., and Popov S. V., J. Comm. Tech. Electron. **69** (4–6), 219–226 (2024).
2. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., and Razumov V. F., Russ. Chem. Rev. **93** (4), RCR5113 (2024).
3. Popov V. S., Ponomarenko V. P., Dirochka A. I., and Popov S. V., J. Comm. Tech. Electron. **70** (1), 21–27 (2025).
4. Konstantatos G. and Sargent E. H., Appl. Phys. Lett. **91**, 1 (2007).
5. Gong W., Wang P., Deng W., Zhang X., An B., Li J., Sun Z., Dai D., Liu Z., Li J., Zhang Y., ACS Appl. Mater. Interfaces **14**, 25812 (2022).
6. Xia Y., Chen W., Zhang P., Liu S., Wang K., Yang X., Tang H., Lian L., He J., Liu X., Liang G., Tan M., Gao L., Liu H., Song H., Zhang D., Gao J., Wang K., Lan X., Zhang X., Müller-Buschbaum P., Tang J., and Zhang J., Adv. Funct. Mater. **30**, 2000594 (2020).
7. Liu X., Fu T., Liu J., Wang Y., Jia Y., Wang C., Li X., Zhang X., and Liu Y., ACS Appl. Mater. Interfaces **14**, 14274 (2022).
8. Bakulin A. A., Neutzner S., Bakker H. J., Ottaviani L., Barakel D., and Chen Z., ACS Nano **7**, 8771 (2013).
9. Koroleva T. V., Medvedev A. G., Khakimov K. T., Yakovlev V. O., Saptsova O. A., Koronov A. A., Chemakina Y. A., Asnachev D. D., Vershinina O. V., Ponomarenko V. P., and Popov V. S., Optical Materials **175**, 118029 (2026).

10. Bube R. Photoconductivity of Solids. NY-London: John Wiley & Sons, 1960.
11. Le B. Q., Van T. N., Quang D. T., Le Dinh V., Van T. P., and Kim N. C. T., J. Semicond. **46**, 072101 (2025).
12. Konstantatos G., Levina L., Fischer A., and Sargent E. H., Nano Lett. **8**, 1446 (2008).

Об авторах

Яковлев Виктор Олегович, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: iakovlev.vo@mipt.ru SPIN-код: 3324-6931, AuthorID: 1290912, ORCID 0009-0009-3507-082X

Королева Таисия Викторовна, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: koroleva.tv@mipt.ru SPIN-код: 6991-6170, AuthorID: 1292280, ORCID 0000-0003-0792-1948

Хакимов Карим Тимурович, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: khakimov.kt@mipt.ru SPIN-код: 8812-6012, AuthorID: 1209525, ORCID 0000-0001-8133-6128

Сапцова Ольга Александровна, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: sapctsova.oa@mipt.ru SPIN-код: 3710-5884, AuthorID: 1323937, ORCID 0009-0008-5445-4629

Короннов Алексей Алексеевич, к.т.н., старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: koronnov.aa@mipt.ru SPIN-код: 9854-4380, AuthorID: 116157, ORCID 0000-0001-6046-3400

Вершинина Олеся Валерьевна, младший научный сотрудник, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: seraia.ov@phystech.edu

Медведев Александр Геннадьевич, к.х.н., зам. заведующего лабораторией, старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: medvedev.ag@mipt.ru SPIN-код: 3699-6664, AuthorID: 822022, ORCID 0000-0002-6762-004X

Пономаренко Владимир Павлович, д.ф.-м.н., главный конструктор, заведующий кафедрой, профессор, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9); АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: 2392325@gmail.com SPIN-код: 6882-8721, AuthorID: 171358

Попов Виктор Сергеевич, к.х.н., заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, доцент, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9); начальник центра, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: popov.vs@mipt.ru SPIN-код: 1128-2332, AuthorID: 625948, ORCID 0000-0002-0962-9775