

УДК 621.383
EDN: IJZHSI

PACS: 85.60.–q

**Капсуляция фоторезистивных структур на основе коллоидных
квантовых точек HgTe методом атомно-слоевого осаждения**© А. Г. Медведев¹, Д. С. Кузьмичёв¹, О. А. Сапцова¹, Т. В. Королева¹, К. Т. Хакимов¹,
В. О. Яковлев¹, В. П. Пономаренко^{1,2}, В. С. Попов^{1,2,*}¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия
*E-mail: popov.vs@mipt.ru²АО «НПО «Орион», Москва, 111538 РоссияСтатья поступила в редакцию 25.12.2025; после доработки 19.01.2026; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Коллоидные квантовые точки (ККТ) являются перспективным материалом для создания недорогих фотодетекторов инфракрасного диапазона, работающих при комнатной температуре. Однако формирование фоточувствительных слоев на их основе сопровождается образованием поверхностных дефектов и окислением, что приводит к деградации рабочих характеристик устройств. В данной работе для эффективной капсуляции слоя ККТ на основе теллурида ртути HgTe впервые предложено использовать метод атомно-слоевого осаждения для нанесения тонких пленок оксида гафния HfO₂. Целесообразность нанесения капсулирующего слоя HfO₂ подтверждена исследованиями фотоэлектрических характеристик изготовленных фоторезисторов. Показано, что защитное покрытие способствует снижению величины темнового тока при сохранении величины фотоотклика фоторезистора при облучении лазерным диодом с длиной волны 1550 нм. Полученные результаты демонстрируют потенциал метода АСО для создания стабильных и высокопроизводительных фотодетекторов ИК-диапазона нового поколения.

Ключевые слова: фотосенсор, средневолновый ИК-диапазон, коллоидные квантовые точки, ККТ, атомно-слоевое осаждение, капсуляция, оксид гафния.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-23-30

Введение

Фотодетекторы ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными детекторами (например, на основе InGaAs или МСТ), что обусловлено низкой стоимостью и простотой синтеза ККТ методами «мокрой химии», совместимостью с CMOS-технологией, возможностью работы при комнатной температуре и механической гибкостью сформированных светочувстви-

тельных слоев на подложках [1–5]. Возможность управления спектральными характеристиками ККТ теллурида ртути HgTe за счет эффекта квантового размерного ограничения позволяет изменять длину волны их поглощения от ближнего до дальнего ИК-диапазона. Это достигается контролем размера нанокристаллов в процессе синтеза, что делает данный материал перспективным для создания ИК-фотодетекторов [6]. Однако, несмотря на относительную стабильность ККТ теллурида ртути, процесс получения фоточувствитель-

ных слоев может приводить к возникновению нежелательных поверхностных состояний, и/или медленного разрушения поверхностного слоя вследствие окисления при контакте с влажным воздухом [7–9]. Кроме того, изменение стехиометрии при пост синтетической обработке нанокристаллов и формировании структур также приводит к резкому возрастанию ловушечных состояний и ухудшению чувствительности и быстродействия.

Одним из подробно разработанных и эффективных способов получения тонких пленок является технология атомно-слоевого осаждения (АСО, Atomic Layer Deposition, ALD), которая заключается в последовательных химических реакциях и имеет свойство самоограничения [10–13]. В процессе АСО прекурсоры поочередно вступают в многократное взаимодействие с поверхностью и, в результате, происходит воспроизводимый рост тонкой плёнки толщиной в монослой за одну стадию, в том числе на подложках сложной формы. Самоограничение поверхностных реакций позволяет контролировать осаждение на атомарном уровне. Процесс АСО развивался в связи с необходимостью получения качественных диэлектрических и люминесцентных плёнок, которые должны быть нанесены на подложки с большой площадью [14]. АСО используется для нанесения различных типов тонких плёнок, в том числе оксидных (Al_2O_3 , TiO_2 , SnO_2 , ZnO , HfO_2), нитридных (TiN , TaN , WN , NbN), металлических (Ru , Ir , Pt) и сульфидных (ZnS) для разнообразных применений в производстве полупроводниковой микроэлектроники [15–20], фотовольтаических устройств [21–25] и устройств хранения энергии [26–28], катализаторов [29, 30], полупроводниковых газовых сенсоров [31–34], оптики и фотоники [35–37] и многих других [38]. Однако, метод АСО является относительно дорогим как с точки зрения сложности аппаратного оформления, так и вследствие высоких требований к чистоте и качеству используемых прекурсоров и подложек.

Применительно к фотодетекторам ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек метод АСО используется для нанесения пассивирующей пленки оксида алюминия для улучшения стабильности при проведении операций изготовления на воздухе. Например, для оптимизации параметров фоточувстви-

тельности и стабильности детекторов на основе сульфида PbS и селенида свинца PbSe [39, 40] и теллурида ртути HgTe [41].

В данной статье предложено использовать метод АСО для формирования защитного покрытия оксида гафния HfO_2 на массиве ККТ теллурида ртути HgTe . Развитие метода АСО сделало его конкурентным преимуществом возможность осаждения пленок при относительно низких температурах (менее 150°C), что обеспечивает стабильность поверхностного слоя неустойчивых материалов, в том числе биологических и органических образцов. Эффективность капсуляции контролировали измерением фоточувствительных характеристик фоторезистора: темнового тока и величины фотоотклика при облучении светом излучающим диодом 1550 нм.

Экспериментальная часть

Синтез ККТ HgTe

ККТ HgTe были синтезированы методом горячей инъекции согласно протоколу, описанному ранее [41] при температуре реакции 80°C и времени реакции 30 минут для получения ККТ требуемого размера.

Методика формирования фоторезистивной структуры

ККТ наносили на кварцевую подложку с площадками из встречно-штыревых Au электродов, с промежуточной послойной активацией раствором этандитиола в соляной кислоте и изопропанолем HCl:EDT:IPA (1:1:20 по об.) и промывкой изопропиловым спиртом.

Методика капсуляции фоторезистивной структуры

Рост пленки HfO_2 производили при температуре реакционной камеры 90°C с использованием $\text{Hf}[\text{N}(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)]_4$ (ТЕМАН) и H_2O в качестве прекурсоров. Длительность напуска ТЕМАН в реакционную камеру составляла 0,5 с, продувка – 12 с. Длительность напуска паров воды составляла 0,1 с, длительность продувки – 12 с. Температуры баллонов с ТЕМАН и H_2O поддерживались стабильными во время всего процесса осаждения равными 100°C и 20°C , соответственно. Толщина защитного покрытия (27 нм) и скорость роста

($\sim 1,36$ Å/цикл) определялись с помощью эллипсометра с длиной волны 632 нм на образце-спутнике из кремния с естественным окислом.

Спектры ИК-Фурье были записаны на ИК-Фурье спектрометре Spectrum 100 (PerkinElmer, США) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО).

Зависимость тока, протекающего через исследуемый фоторезистор, от времени при импульсной засветке регистрировали при помощи источника-измерителя Keithley 2636В при постоянном напряжении смещения $U = 0,1$ В. Для импульсной засветки применяли лазерный диод с волоконным выводом излучения на длину волны 1550 нм (мощность 8 мВт). Лазерный диод работал в режиме прямоугольной модуляции (период 4 с, длительность импульса 2 с), задаваемой генератором FeelTech FeelElec FY6900 60М. Излучение от лазерного диода проходило через коллиматор и далее фокусировалось собирающей кремниевой линзой в световое пятно диаметром около 300 мкм на фоточувствительной области исследуемого образца. Все измерения проводили при нормальных условиях на воздухе.

Обсуждение результатов

Синтез ККТ теллурида ртути проводили методом горячей инъекции взаимодействием хлорида ртути и раствора теллура в триоктилфосфине. Максимум пика поглощения ККТ, синтезированных при температуре 80 °С и времени роста нанокристаллов 30 мин по данным ИК-Фурье спектроскопии, составил 2,83 мкм с полной шириной на полувысоте FWHM 0,4 мкм (рис. 1), что указывает на достаточно узкое распределение размеров нанокристаллов теллурида ртути. Изменение времени синтеза и природы прекурсоров ртути и халькогенида позволяет контролировать спектральные характеристики ККТ на основе халькогенидов ртути [42–44]. Приготовление фоторезистора осуществляли послойным нанесением пленок ККТ теллурида ртути из дисперсии методом спин-коутинга. При этом поверхность слоя обрабатывали раствором этандитиола для замены длинноцепочечных лигандов олеиламина на поверхности ККТ,

что является признанным подходом для настройки спектральных характеристик ККТ и снижения числа поверхностных состояний [45, 46].

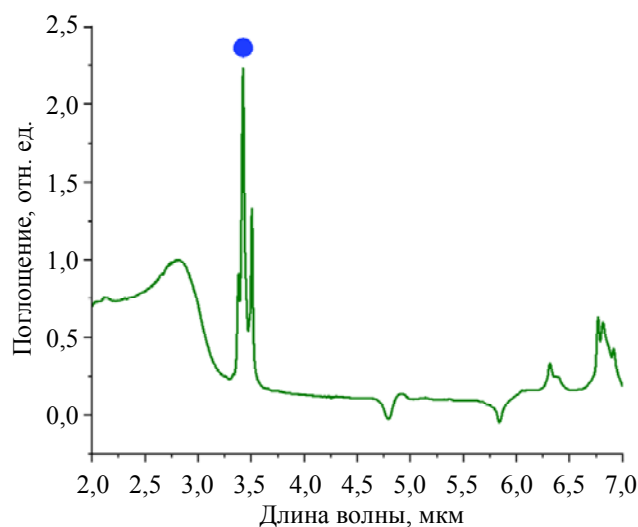


Рис. 1. ИК-спектр ККТ HgTe, полученных при температуре синтеза 80 °С и времени 30 мин. Точкой отмечено положение пика, отвечающего валентным колебаниям C-H лигандной оболочки

Хранение фоторезисторной структуры на воздухе приводит к изменениям фотосенсорных характеристик. Так, экспонирование в течение 15 дней приводит к увеличению темнового тока на контактах с межэлектродным расстоянием 10 мкм с $1,62 \times 10^{-4}$ до $3,63 \times 10^{-4}$ А, в то время как при измерениях на контактах с межэлектродным расстоянием 2120 мкм темновой ток увеличился с $5,22 \times 10^{-8}$ до $1,09 \times 10^{-7}$ А. Амплитуда фотоотклика, рассчитываемая как разность токов при засветке лазером 1550 нм и темнового тока, при выдерживании в течение 15 дней увеличилась с $2,88 \times 10^{-7}$ до $2,18 \times 10^{-6}$ на контактах с коротким межэлектродным расстоянием и уменьшилась с $5,79 \times 10^{-10}$ до $3,47 \times 10^{-10}$ А при измерении на контактах с длинным межэлектродным расстоянием. По-видимому, это связано с возможным образованием поверхностных состояний, вызванных адсорбцией и химическим взаимодействием с кислородом и водой. Наблюдаемые изменения характеристик демонстрируют относительно низкую стабильность образца. В связи с изменением фоточувствительных характеристик предложено выполнить капсуляцию фоторезисторной структуры тонкой пленкой оксида гафния.

Капсуляцию фоторезистора пленкой оксида гафния осуществляли при относительно низкой температуре реакционной камеры 90 °С [47]. Толщина защитного покрытия составила 27 нм. Эффективность применения такого подхода исследовали сравнительным анализом величин темнового тока, формы нарастания и затухания фотосигнала, и амплитуды фотосигнала до и после нанесения защитного покрытия оксида гафния при облучении лазером 1550 нм. Капсуляция приводит к снижению величины темнового тока до $5,47 \times 10^{-5}$ и $1,38 \times 10^{-8}$ А при измерении на контактах с межэлектродным расстоянием 10 мкм и 2120 мкм, соответственно. При этом амплитуда фотоотклика уменьшилась незначительно до $9,69 \times 10^{-7}$ и $2,10 \times 10^{-10}$ А, соответственно.

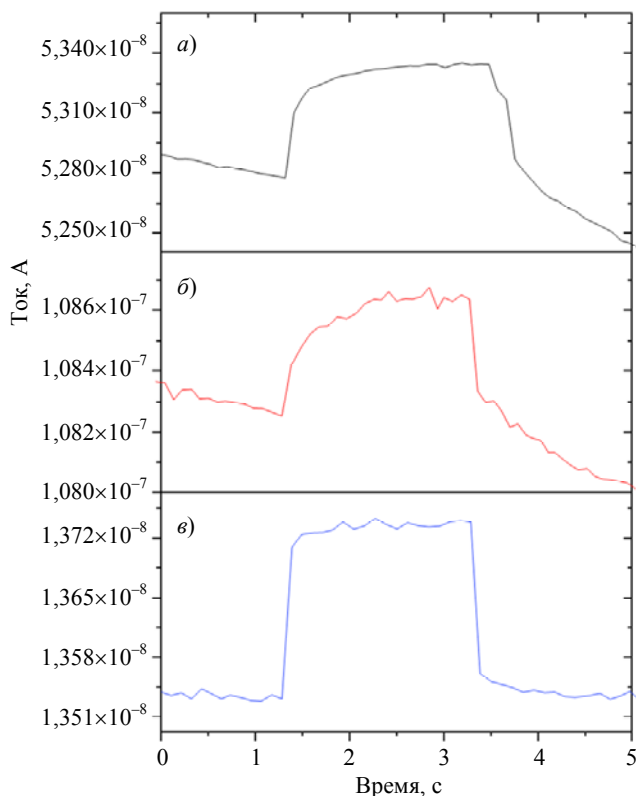


Рис. 2. Фотоотклик при засветке лазерным диодом с длиной волны 1550 нм фоторезистивной структуры свежеприготовленной структуры (а), после выдерживания на воздухе в течение 15 дней (б) и после нанесения пленки оксида гафния (в)

На рис. 2. представлены формы фотооткликов при облучении структуры лазером 1550 нм после изготовления, после 15 дней экспонирования на воздухе и после капсуляции тонкой пленкой оксида гафния. Следует

отметить, что результаты измерений приведены без удаления фона. Капсуляция структуры приводит к резкому уменьшению дрейфа темнового тока, при этом наблюдается быстрое нарастание фотосигнала до установления постоянного значения (рис. 2в), тогда как образец до капсуляции характеризовался сильным дрейфом темнового тока (рис. 2а, б) и медленным выходом фотосигнала на равновесное значение. Кроме того, следует отметить отсутствие области медленного затухания сигнала после капсуляции по сравнению со свежеприготовленной структурой и структурой, выдержанной на воздухе в течение 15 дней.

Несмотря на необходимость проведения дополнительных более глубоких исследований полученные предварительные результаты показывают эффективность капсуляции фоторезистивных структур ККТ тонкой пленкой оксида гафния методом АСО, сформированной при относительно низкой температуре. Это открывает широкие возможности по снижению темнового тока и повышению стабильности при изготовлении фоточувствительных слоев фотодетекторов ИК-диапазона на основе ККТ.

Заключение

Методом горячей инжекции получены коллоидные квантовые точки теллурида ртути с максимумом пика поглощения при 2,83 мкм, на основе которых изготовлена фоторезистивная структура на золотых встречно-штыревых электродах. Показана эффективность капсуляции полученной структуры тонкой защитной пленкой оксида гафния, осажденной методом АСО при относительно низкой температуре 90 °С. Осаждение пленки оксида гафния приводит к снижению величин темновых токов, сохранению величин фотоотклика, уменьшению дрейфа темнового тока и ускорению затухания сигнала при засветке структуры лазерным диодом 1550 нм. Полученные сведения показывают перспективу применения низкотемпературного АСО для получения тонких капсулирующих пленок оксида гафния в фотодетекторах ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов различных металлов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., Razumov V. F. / Russ. Chem. Rev. 2024. № 93. P. RCR5113.
2. Kim D., Si M.-J., Kim J., Jung Y., Baek S.-W. / Adv. Opt. Mater. 2025. P. 02859.
3. Yu L., Tian P., Liang K., Yu L., Tian P., Liang K. / Quantum Beam Sci. 2025. Vol. 9. № 1. P. 9.
4. Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Дев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Лазарев П. С., Мирофянченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спиринов М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Демкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. / Прикладная физика. 2025. № 1. С. 45–54.
5. Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Дев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Зарипов Ш. И., Лазарев П. С., Мирофянченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спиринов М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Демкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. / Прикладная Физика. 2025. № 2. С. 12–20.
6. Sergeeva K. A., Zhang H., Portniagin A. S., Bossavit E., Mu G., Kershaw S. V., Ithurria S., Guyot-Sionnest P., Keuleyan S., Delerue C., Tang X., Rogach A. L., Lhuillier E. / Adv. Funct. Mater. 2024. № 34. P. 2405307.
7. Dou H., Yuan C., Zhu R., Li L., Zhang J., Wenig T. C. / Nanomaterials. 2024. № 14. P. 34.
8. Kahmann S., Loi M. A. / Appl. Phys. Rev. 2020. Vol. 7. P. 041305.
9. Giansante C., Infante I. / J. Phys. Chem. Lett. 2017. № 8. P. 5209–5215.
10. Kol'tsov S. I. / J. Appl. Chem. USSR. 1965. № 38. P. 1352.
11. Malygin A. A., Drozd V. E., Malkov A. A., Smirnov V. M. / Chem. Vapor Depos. 2015. № 21. P. 216–240.
12. Puurunen R. L. / Chem. Vapor Depos. 2014. № 20. P. 332–344.
13. Parsons G. N., Elam J. W., George S. M., Haukka S., Jeon H., Kessels W. M. M. (Erwin), Leskelä M., Poodt P., Ritala M., Rossnagel S. M. / J. Vac. Sci. Technol. A. 2013. Vol. 31. P. 050818.
14. Suntola T. / Mater. Sci. Rep. 1989. Vol. 4. № 5. P. 261–312.
15. Ovanesyan R. A., Filatova E. A., Elliott S. D., Hausmann D. M., Smith D. C., Agarwal S. / J. Vac. Sci. Technol. A. 2019. Vol. 37. P. 261–312.
16. Kim S. E., Sung J. Y., Yun Y., Jeon B., Moon S. M., Lee H. Bin, Lee C. H., Jung H. J., Lee J. U., Lee S. W. / Curr. Appl. Physics. 2024. Vol. 64. P. 8–15.
17. Choi A. R., Lim D. H., Shin S. Y., Kang H. J., Kim D., Kim J. Y., Ahn Y., Ryu S. W., Oh I. K. / Chem. Mater. 2024. Vol. 36. P. 2194–2219.
18. O'Brien K. P., Naylor C. H., Dorow C., Maxey K., Penumatcha A. V., Vyatskikh A., Zhong T., Kitamura A., Lee S., Rogan C., Mortelmans W., Kavrik M. S., Steinhardt R., Buragohain P., Dutta S., Tronic T., Clendenning S., Fischer P., Putna E. S., Radosavljevic M., Metz M., Avci U. / Nat. Commun. 2023. Vol. 14. P. 6400.
19. Chernikova A. G., Sizykh N. A., Zabrosae I. V., Markeev A. M. / Surf. Interfaces. 2025. Vol. 62. P. 106135.
20. Koroleva A. A., Kuzmichev D. S., Kozodaev M. G., Zabrosae I. V., Korostylev E. V., Markeev A. M. / Appl. Phys. Lett. 2023. Vol. 122. № 2. P. 022905.
21. Niu W., Li X., Karuturi S. K., Fam D. W., Fan H., Shrestha S., Wong L. H., Tok A. I. Y. / Nanotechnology. 2015. Vol. 26. P. 064001.
22. Van Delft J. A., Garcia-Alonso D., Kessels W. M. M. / Semicond. Sci. Technol. 2012. Vol. 27. P. 074002.
23. Zardetto V., Williams B. L., Perrotta A., Di Giacomo F., Verheijen M. A., Andriessen R., Kessels W. M. M., Creatore M. / Sustain. Energy Fuels. 2017. Vol. 1. P. 30–55.
24. Dingemans G., Kessels W. M. M. / J. Vac. Sci. Technol. A. 2012. Vol. 30. P. 040802.
25. Zaera F. / Chem. Soc. Rev. 2013. Vol. 42. P. 2746–2762.
26. Hu Y., Miikkulainen V., Mizohata K., Norby T., Nilsen O., Fjellvåg H. / Electrochim. Acta. 2020. Vol. 361. P. 137019.
27. Put B., Mees M. J., Hornsveid N., Hollevoet S., Sepúlveda A., Vereecken P. M., Kessels W. M. M., Creatore M. / J. Electrochem. Soc. 2019. Vol. 166. P. A1239.
28. Kozen A. C., Pearse A. J., Lin C. F., Noked M., Rubloff G. W. / Chem. Mater. 2015. Vol. 27. P. 5324–5331.
29. O'Neill B. J., Jackson D. H. K., Lee J., Canlas C., Stair P. C., Marshall C. L., Elam J. W., Kuech T. F., Dumesic J. A., Huber G. W. / ACS Catal. 2015. Vol. 5. P. 1804–1825.
30. Shim J. W., Lee Y. S., Choi Y. S., Henke T., Knaut M., Hossbach C., Mane A. U., Tong W. M., Brodie A. D., Mackus A. J. M., Weber M. J., Thissen N. F. W., Garcia-Alonso D., Vervuurt R. H. J., Assali S., Bol A. A., Verheijen M. A., Kessels W. M. M. / Nanotechnology. 2015. Vol. 27. P. 034001.
31. Мокрушин А. С., Дмитриева С. А., Горбань Ю. М., Стройкова А. Р., Симоненко Н. П., Аверин А. А., Симоненко Е. П. / Неорганическая химия. 2025. Т. 70. № 4. С. 606–614.
32. Mokrushin A. S., Simonenko E. P., Simonenko N. P., Akkuleva K. T., Antipov V. V., Zaharova N. V., Malygin A. A., Bukunov K. A., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T. / Appl. Surf. Sci. 2019. Vol. 463. P. 197–202.
33. Pan H., Zhou L., Zheng W., Liu X., Zhang J., Pinna N. / Internat. J. Extreme Manufact. 2023. № 5. P. 022008.
34. Cho B., Hahn M. G., Choi M., Yoon J., Kim A. R., Lee Y. J., Park S. G., Kwon J. D., Kim C. S., Song M., Jeong Y., Nam K. S., Lee S., Yoo T. J., Kang C. G., Lee B. H.,

- Ko H. C., Ajayan P. M., Kim D. H. / Sci. Rep. 2015. Vol. 5. P. 8052.
35. Leskelä M., Mattinen M., Ritala M. / J. Vacuum Sci. Technol. B. 2019. Vol. 37. P. 030801.
36. He G., Zhu L., Sun Z., Wan Q., Zhang L. / Prog. Mater. Sci. 2011. Vol. 56. № 5. P. 475–572.
37. Войцеховский А. В., Дзядах С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2025. № 5. С. 15–24.
38. Kessels E., Devi A., Park J. S., Ritala M., Yanguas-Gil A., Wiemer C. / Nat. Rev. Methods Primers. 2025. Vol. 5. P. 66.
39. Hu C., Gassenq A., Justo Y., Devloo-Casier K., Chen H., Detavernier C., Hens Z., Roelkens G. / Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. № 17. P. 171110.
40. Liu Y., Tolentino J., Gibbs M., Ihly R., Perkins C. L., Liu Y., Crawford N., Hemminger J. C., Law M. / Nano Lett. 2013. Vol. 13. P. 1578–1587.
41. Malachosky E. W., Ackerman M. M., Stan L. / Nanomaterials. 2024. Vol. 14. № 16. P. 1354.
42. Шуклов И. А., Миленкович Т., Майорова А. В., Вершинина О. В., Иванова В. А., Павлова В. Д., Попов В. С. / Прикладная физика. 2024. № 1. С. 43–50.
43. Шуклов И. А., Миленкович Т., Вершинина О. В., Дубровина Н. В., Сапцова О. А., Попов В. С., Иванов В. В. / Прикладная физика. 2025. № 3. С. 34–41.
44. Попов В. С., Миленкович Т., Хакимов К. Т., Королева Т. В., Деомидов А. Д., Давлетишин Р. В., Хамидуллин К. А., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Шуклов И. А., Короннов А. А., Егоров А. В., Пономаренко В. П. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 47–53.
45. Brown P. R., Kim D., Lunt R. R., Zhao N., Bawendi M. G., Grossman J. C., Bulović V. / ACS Nano. 2014. Vol. 8. P. 5863–5872.
46. Шуклов И. А., Демкин Д. В., Конавичева В. А., Попов В. С., Разумов В. Ф. / Прикладная физика. 2022. № 6. С. 35–42.
47. Chernikova A. G., Kuzmichev D. S., Negrov D. V., Kozodaev M. G., Polyakov S. N., Markeev A. M. / Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108. P. 242905.

PACS: 85.60.–q

Encapsulation of photoresistive structures based on colloidal HgTe quantum dots by atomic layer deposition

A. G. Medvedev¹, D. S. Kuzmichev¹, O. A. Saptsova¹, T. V. Koroleva¹, K. T. Khakimov¹, V. O. Yakovlev¹, V. P. Ponomarenko^{1,2}, and V. S. Popov^{1,2,*}

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

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

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

Received 25.12.2025; revised 19.01.2026; accepted 20.02.2026

Colloidal quantum dots (CQDs) are a promising material for low-cost infrared photodetectors operating at room temperature. However, the formation of CQD based photosensitive layers is accompanied by the formation of surface defects and oxidation, which leads to the degradation of the devices' performance. In this study, we propose using atomic layer deposition (ALD) to efficiently encapsulate a mercury telluride (HgTe) CQD layer by depositing thin films of hafnium oxide (HfO₂) for the first time. The feasibility of applying the HfO₂ encapsulating layer is confirmed by studying the photoelectric characteristics of the manufactured photoresistors. It is shown that the protective coating reduce the dark current while maintaining the photore-sistor's photoresponse under 1550 nm laser irradiation. The obtained results demonstrate the potential of ALD for creating stable and high-performance next-generation IR photodetectors.

Keywords: photosensor; mid-wave IR range; colloidal quantum dots; atomic layer deposition; encapsulation; hafnium oxide.

REFERENCES

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., and Razumov V. F., *Russ. Chem. Rev.* **93** (4), RCR5113 (2024).
2. Kim D., Si M.-J., Kim J., Jung Y., and Baek S.-W., *Adv. Opt. Mater.* e02859 (2025).
3. Yu L., Tian P., Liang K., Yu L., Tian P., and Liang K., *Quantum Beam Sci.* **9** (1), 9 (2025).
4. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Pankov M. A., et al., *Applied Physics*, № 1, 45–54 (2025) [in Russian].
5. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Pankov M. A., et al., *Applied Physics*, № 2, 12–20 (2025) [in Russian].
6. Sergeeva K. A., Zhang H., Portniagin A. S., et al., *Adv. Funct. Mater.* **34** (39) 2405307 (2024).
7. Dou H., Yuan C., Zhu R., Li L., Zhang J., and Weng T. C., *Nanomaterials* **14** (1), 34 (2024).
8. Kahmann S. and Loi M. A., *Appl. Phys. Rev.* **7** (4) 041305 (2020).
9. Giansante C. and Infante I., *J. Phys. Chem. Lett.* **8** (20), 5209–5215 (2017).
10. Kol'tsov S. I., *J. Appl. Chem. USSR* **38**, 1352 (1965).
11. Malygin A. A., Drozd V. E., Malkov A. A., and Smirnov V. M., *Chem. Vapor Depos.* **21** (10-12), 216–240, (2015).
12. Puurunen R. L., *Chem. Vapor Depos.* **20** (10-12), 332–344 (2014).
13. Parsons G. N., Elam J. W., George S. M., Haukka S., Jeon H., Kessels W. M. M., Leskelä M., Poodt P., Ritala M., and Rossnagel S. M., *J. Vac. Sci. Technol. A* **31** (5), 050818 (2013).
14. Suntola T., *Mater. Sci. Rep.* **4** (5), 261–312 (1989).
15. Ovanesyan R. A., Filatova E. A., Elliott S. D., Hausmann D. M., Smith D. C., and Agarwal S., *J. Vac. Sci. Technol. A* **37**, 060904 (2019).
16. Kim S. E., Sung J. Y., Yun Y., Jeon B., Moon S. M., Lee H., Lee C. H., Jung H. J., Lee J. U., and Lee S. W., *Curr. Appl. Phys.* **64**, 8–15 (2024).
17. Choi A. R., Lim D. H., Shin S. Y., Kang H. J., Kim D., Kim J. Y., Ahn Y., Ryu S. W., and Oh I. K., *Chem. Mater.* **36** (5), 2194–2219 (2024).
18. O'Brien K. P., Naylor C. H., Dorow C., et al., *Nat. Commun.* **14** (1), 6400 (2023).
19. Chernikova A. G., Sizykh N. A., Zabrosaev I. V., and Markeev A. M., *Surf. Interfaces* **62**, 106135 (2025).
20. Koroleva A. A., Kuzmichev D. S., Kozodaev M. G., Zabrosaev I. V., Korostylev E. V., and Markeev A. M., *Appl. Phys. Lett.* **122** (2), 022905 (2023).
21. Niu W., Li X., Karuturi S. K., Fam D. W., Fan H., Shrestha S., Wong L. H., and Tok A. I. Y., *Nanotechnol.* **26** (6), 064001 (2015).
22. Van Delft J. A., Garcia-Alonso D., and Kessels W. M. M., *Semicond. Sci. Technol.* **27** (7), 074002 (2012).
23. Zardetto V., Williams B. L., Perrotta A., Di Giacomo F., Verheijen M. A., Andriessen R., Kessels W. M. M. and Creatore M., *Sustain. Energy Fuels* **1** (1) 30–55 (2017).
24. Dingemans G. and Kessels W. M. M., *J. Vac. Sci. Technol. A* **30** (4), 040802 (2012).
25. Zaera F., *Chem. Soc. Rev.* **42** (7), 2746–2762 (2013).
26. Hu Y., Miikkulainen V., Mizohata K., Norby T., Nilsen O., and Fjellvåg H., *Electrochim. Acta* **361**, 137019 (2020).
27. Put B., Mees M. J., Hornsveld N., Hollevoet S., Sepúlveda A., Vereecken P. M., Kessels W. M. M., and Creatore M. J., *Electrochem. Soc.*, **166** (6), A1239 (2019).
28. Kozen A. C., Pearse A. J., Lin C. F., Noked M., and Rubloff G. W., *Chem. Mater.* **27** (15), 5324–5331 (2015).
29. Oneill B. J., Jackson D. H. K., Lee J., Canlas C., Stair P. C., Marshall C. L., Elam J. W., Kuech T. F., Dumesic J. A., and Huber G. W., *ACS Catal.* **5** (3), 1804–1825 (2015).
30. Woo Shim J., Seok Lee Y., Sung Choi Y., Henke T., Knaut M., Hossbach C., Mane A. U., Tong W. M., Brodie A. D., Mackus A. J., Weber M. J., Thissen N. F., Garcia-Alonso D., Vervuurt R. H., Assali S., Bol A. A., Verheijen M. A., and Kessels W. M., *Nanotechnol.* **27** (3), 034001 (2015).
31. Mokrushin A. S., Dmitrieva S. A., Gorban Y. M., Stroikova A. R., Simonenko N. P., Averin A. A., and Simonenko E. P., *Russ. J. Inorg. Chem.* **70**, 624–632 (2025).
32. Mokrushin A. S., Simonenko E. P., Simonenko N. P., Akkuleva K. T., Antipov V. V., Zaharova N. V., Malygin A. A., Bukunov K. A., Sevastyanov V. G., and Kuznetsov N. T., *Appl. Surf. Sci.* **463**, 197–202 (2019).
33. Pan H., Zhou L., Zheng W., Liu X., Zhang J., and Pinna N., *Int. J. Extreme Manufact.* **5** (2), 022008 (2023).
34. Cho B., Hahm M. G., Choi M., Yoon J., Kim A. R., Lee Y. J., Park S. G., Kwon J. D., Kim C. S., Song M., Jeong Y., Nam K. S., Lee S., Yoo T. J., Kang C. G., Lee B. H., Ko H. C., Ajayan P. M., and Kim D. H., *Sci. Rep.* **5** (1), 8052 (2015).
35. Leskelä M., Mattinen M., and Ritala M., *J. Vac. Sci. Technol. B* **37**, 030801 (2019).
36. He G., Zhu L., Sun Z., Wan Q., and Zhang L., *Prog. Mater. Sci.*, **56** (5), 475–572 (2011).
37. Voitsekhovskii A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoret'skii S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., and Yakushev M. V., *Applied Physics*, № 5, 15–24 (2025) [in Russian].
38. Kessels E., Devi A., Park J. S., Ritala M., Yanguas-Gil A., and Wiemer C., *Nat. Rev. Methods Primers* **5**, 66 (2025).

39. Hu C., Gassenq A., Justo Y., Devloo-Casier K., Chen H., Detavernier C., Hens Z., and Roelkens G., Appl. Phys. Lett. **105** (17), 171110 (2014).
40. Liu Y., Tolentino J., Gibbs M., Ihly R., Perkins C. L., Liu Y., Crawford N., Hemminger J. C., and Law M., Nano Lett. **13** (4), 1578–1587 (2013).
41. Malachosky E. W., Ackerman M. M., and Stan L., Nanomaterials **14** (16), 1354 (2024).
42. Shuklov I. A., Milenkovich T., Majorova A. V., Vershinina O. V., Ivanova V. A., Pavlova V. D., and Popov V. S., J. Comm. Tech. Electron. **70** (2), 61–67 (2025).
43. Shuklov I. A., Milenkovich T., Vershinina O. V., Dubrovina N. V., Saptsova O. A., Popov V. S., and Ivanov V. V., Applied Physics, № 3, 34–41 (2025) [in Russian].
44. Popov V. S., Milenkovich T., Khakimov K. T., Koroleva T. V., Deomidov A. D., Davletshin R. V., Khamidullin K. A., Saptsova O. A., Yakovlev V. O., Shuklov I. A., Koronnov A. A., Egorov A. V., and Ponomarenko V. P., J. Comm. Tech. Electron. **70** (6), 278–282 (2025).
45. Brown P. R., Kim D., Lunt R. R., Zhao N., Bawendi M. G., Grossman J. C., and Bulović V., ACS Nano **8**, 5863–5872 (2014).
46. Shuklov I. A., Dyomkin D. V., Konavicheva V. A., Popov V. S., and Razumov V. F., J. Comm. Tech. Electron. **68** (S2), S184–S189 (2023).
47. Chernikova A. G., Kuzmichev D. S., Negrov D. V., Kozodaev M. G., Polyakov S. N., and Markeev A. M., Appl. Phys. Lett. **108** (24), 242905 (2016).

Об авторах

Медведев Александр Геннадьевич, к.х.н., заместитель 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

Кузьмичёв Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: kuzmichev.ds@mipt.ru SPIN-код: 3865-0101, AuthorID: 822752, ORCID 0000-0002-8901-5051

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: saptsova.oa@mipt.ru SPIN-код: 3710-5884, AuthorID: 1323937, ORCID 0009-0008-5445-4629

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

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

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: 5846-8066, AuthorID: 862015, ORCID 0000-0002-0962-9775