

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 66.017

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11476>**Создание гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn}/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  методами газофазной эпитаксии**П. Н. Бутенко<sup>1</sup>, Р. Б. Тимашов<sup>1</sup>, А. И. Степанов<sup>1</sup>, А. И. Печников<sup>1,2</sup>, А. В. Чикиряка<sup>1</sup>,  
Л. И. Гузилова<sup>1</sup>, С. И. Степанов<sup>2</sup>, В. И. Николаев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>ФГБУН «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук»,  
Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация<sup>2</sup>ООО «Совершенные Кристаллы»,  
пр-кт Тореза, 38, Санкт-Петербург 194223, Российская Федерация**Аннотация**

Оксид хрома со структурой корунда ( $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ), обладающий возможностью иметь проводимость  $p$ -типа, является привлекательным кандидатом для создания высококачественных  $p$ - $n$ -гетеропереходов с корундоподобным оксидом галлия ( $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ). При изготовлении гетероструктуры использовались два метода выращивания из газовой фазы (CVD). Слой  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  толщиной ~ 0.2 мкм был выращен на сапфировой подложке (0001) с использованием метода ультразвукового осаждения мелкодисперсного аэрозоля (mist-CVD) при температуре 800 °С. Обнаружено, что полученный слой обладает высокой морфологической однородностью и низкой шероховатостью, что приемлемо для дальнейших эпитаксиальных процессов. В дальнейшем слой  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , легированный Sn, толщиной ~ 1.5 мкм был выращен на слое  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  с использованием метода гидридной парофазной эпитаксии (HVPE) при 500 °С. Показана возможность изготовления данной гетероструктуры с заданной толщиной слоя и приемлемой морфологией поверхности методами CVD.

**Ключевые слова:** оксид галлия, оксид хрома, сапфировая подложка, гетероэпитаксия, газофазная эпитаксия, метод ультразвукового осаждения мелкодисперсного аэрозоля, метод гидридной парофазной эпитаксии

**Источник финансирования:** П. Н. Бутенко, А. И. Печников и Л. И. Гузилова выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (грант № 23-29-10196).

**Для цитирования:** Бутенко П. Н., Тимашов Р. Б., Степанов А. И., Печников А. И., Чикиряка А. В., Гузилова Л. И., Степанов С. И., Николаев В. И. Создание гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn}/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  методами газофазной эпитаксии. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(4): 542–547. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11476>

**For citation:** Butenko P. N., Timashov R. B., Stepanov A. I., Pechnikov A. I., Chikiryaka A. V., Guzilova L. I., Stepanov S. I., Nikolaev V. I. Fabrication of  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn}/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  heterostructure by mist CVD and HVPE. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(4): 542–547. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11476>

✉ Павел Николаевич Бутенко, e-mail: [pavel.butenko@mail.ioffe.ru](mailto:pavel.butenko@mail.ioffe.ru)

© Бутенко П. Н., Тимашов Р. Б., Степанов А. И., Печников А. И., Чикиряка А. В., Гузилова Л. И., Степанов С. И., Николаев В. И., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Оксид галлия – полупроводник нового поколения, открывающий перспективы своего применения в силовой и высокочастотной электронике [1–3]. Этот многообещающий материал по своим транспортным, оптоэлектрическим, химическим и механическим свойствам превосходит все известные коммерческие полупроводники [4].  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  обладает корундо-подобным типом кристаллической структуры (R3c). Среди всех пяти полиморфных модификаций  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  имеет наиболее широкую ширину запрещенной зоны ( $E_g = 5.3$  эВ), обладает высокими напряжением пробоя ( $E_c = 8.5$  МВ·см<sup>-1</sup>) и диэлектрической постоянной ( $\epsilon = 10$ ) [5–7]. Sn или Si-легирование  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  позволяет достичь проводимости *n*-типа с увеличением концентрации носителей заряда до  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> [8]. Однако метод, позволяющий достичь проводимости *p*-типа, пока не найден. Это, возможно, является самым большим недостатком данного материала и ограничивает его потенциальное применение.

Однако возможно создание гетероперехода  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  с материалом, обладающим тем же типом кристаллической решетки и демонстрирующим проводимость *p*-типа, например, оксид хрома ( $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ) [9]. Оба материала имеют одинаковую ромбоэдрическую структуру и очень низкое несоответствие решеток в *a*-плоскости (0.4 %). Другим кандидатом может служить оксид иридия ( $\alpha\text{-Ir}_2\text{O}_3$ ), здесь несоответствие решеток составляет 0.3 % [10]. Однако высокая стоимость иридия делает его применение нецелесообразным. Кроме того, возможно использование слоев корундоподобного оксида железа ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), но в данном случае несоответствие решеток  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  составляет уже 1.2 %, его ширина запрещенной зоны 2.3 эВ против 3.0 эВ для  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  [11]. Стоит отметить, что рассогласование решеток в паре  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  велико (3.74 % [12]), но в данном случае выбор ограничен.

Создание гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ /сапфир было ранее нами описано в [13]. Нашей задачей было создать буферный слой  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  с целью повышения кристаллического качества слоя  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Осаждение слоя  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  толщиной 150 нм при помощи магнетронного распыления и последующий отжиг полученного слоя при 500–800 °С позволили вырастить монокристаллический слой  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  и снизить плотность прорастающих дислокаций в 4 раза. Полученные результаты свидетельствуют об изоструктурной

природе данных оксидов и потенциале для их последующих исследований.

С недавнего времени наблюдается особый интерес к выращиванию слоев  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  методами газовой эпитаксии (CVD), в частности, методом ультразвукового осаждения мелкодисперсного аэрозоля (mist-CVD) и методом гидридной паровой эпитаксии (HVPE) [14–17]. Среди всех доступных CVD методов только эти две технологии позволяют получать толстые слои оксида галлия [18,19]. Осаждение слоев вышеуказанными методами обеспечивает высокую скорость роста (несколько микрон в час) и простые схемы их легирования. Их использование позволяет достичь высокого кристаллического качества полученных слоев наряду с высоким качеством морфологии поверхности. Кроме того, они не требуют использования вакуумных установок, следовательно, эти методы экономически более эффективны.

В данной работе для создания гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ /сапфир использовались методы mist-CVD и HVPE. Главной задачей было выявить принципиальную возможность выращивания такой гетероструктуры методом CVD при достижении заданной толщины слоя и сохранении приемлемой морфологии поверхности.

## 2. Эксперимент

Гетероструктуры  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  были выращены на подготовленных для эпитаксии сапфировых подложках с ориентацией (0001).

На первом этапе методом mist-CVD осаждался слой  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Для этого использовался разработанный нами mist-CVD-реактор, оснащенный ультразвуковым преобразователем 2.4 МГц, который производит «капли» диаметром в диапазоне 10–100 нм. Время роста составляло 180 мин, температура подложки поддерживалась в диапазоне 700–850 °С. Подробное описание параметров технологического процесса роста приведено в [20].

На втором этапе происходило осаждение слоя  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  на слой  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  методом HVPE. Для этого процесса был также использован разработанный нами HVPE-реактор. В реакторе, представляющем собой горизонтальную систему с горячими стенками, в качестве прекурсоров использовались хлорид галлия ( $\text{GaCl}$ ) и кислород ( $\text{O}_2$ ). Скорость роста составляла примерно 2.4 мкм/ч, а температура осаждения – 500 °С. Дополнительную информацию о параметрах процесса можно найти также в [20].

Фазовый состав полученных гетероструктур был охарактеризован методом рентгеновской дифракции (РФА) с использованием дифрактометра «Буревестник ДРОН 7» с излучением  $\text{CuK}_{\alpha 1} = 1.5406 \text{ \AA}$ . Шероховатость поверхности слоя  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  измерялась профилометром Mahr MarSurf PS10. Морфологию поверхности слоя  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Phenom ProX, работающего в режиме вторичных электронов. Для визуализации поперечного сечения гетероструктуры и определения толщины слоев образцы раскалывали и исследовали методом СЭМ.

### 3. Обсуждение результатов

Поверхность слоя, подвергнутого последующей эпитаксии, в идеале должна быть максимально гладкой. Визуализация морфологии слоя  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  представлена на рис. 1. Видно, что поверхность имеет однородный рельеф без четких особенностей, за исключением некоторых пятен, связанных с дефектами слоя.

Шероховатость ( $r_a$ ) слоя  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  измерялась профилометром троекратно в обоих направлениях. Значения ( $r_a$ ) оказались близкими, а среднее значение ( $\bar{r}_a$ ) составляет 24 нм, что удовлетворительно для последующего процесса эпитаксии. Некоторые профили поверхности слоя  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  показаны на рис. 2.

На следующем этапе выращивался слой  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  методом HVPE. Морфология поверхности этого слоя изображена на рис. 3, где можно наблюдать отчетливые особенности поверхности.

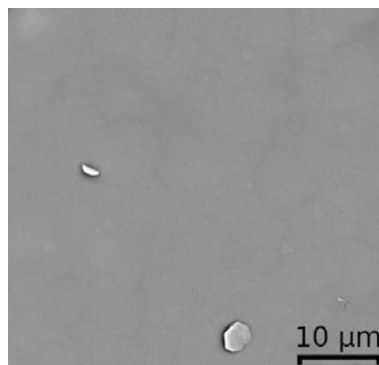


Рис. 1. СЭМ-изображение слоя  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ , осажденного методом mist-CVD

СЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\text{сапфир}$  показано на рис. 4. Толщина слоя  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  практически одинакова в поперечном направлении и составляет примерно 1.5 мкм. Аналогично слой  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  имеет постоянную толщину, хотя и с меньшим значением — около 0.2 мкм.

Анализ рентгенограммы  $\theta\text{-}2\theta$  гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\text{сапфир}$  показал отражения от семейства плоскостей (000*l*) для всех трёх фаз. Они приведены в логарифмическом масштабе на рис. 5. Для  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  рефлекс 0 0 0 6 находится при 41.69 град, рефлекс 0 0 0 12 при 90.69 град; для  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  рефлекс 0 0 0 6 – при 39.8 град, рефлекс 0 0 0 12 – при 85.9 град; для  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  рефлекс 0 0 0 6 находится при 40.25 град, рефлекс 0 0 0 12 при 86.96 град. Значения углов для сапфира и оксида галлия очень хорошо совпадают с табличными. Однако в случае оксида хрома

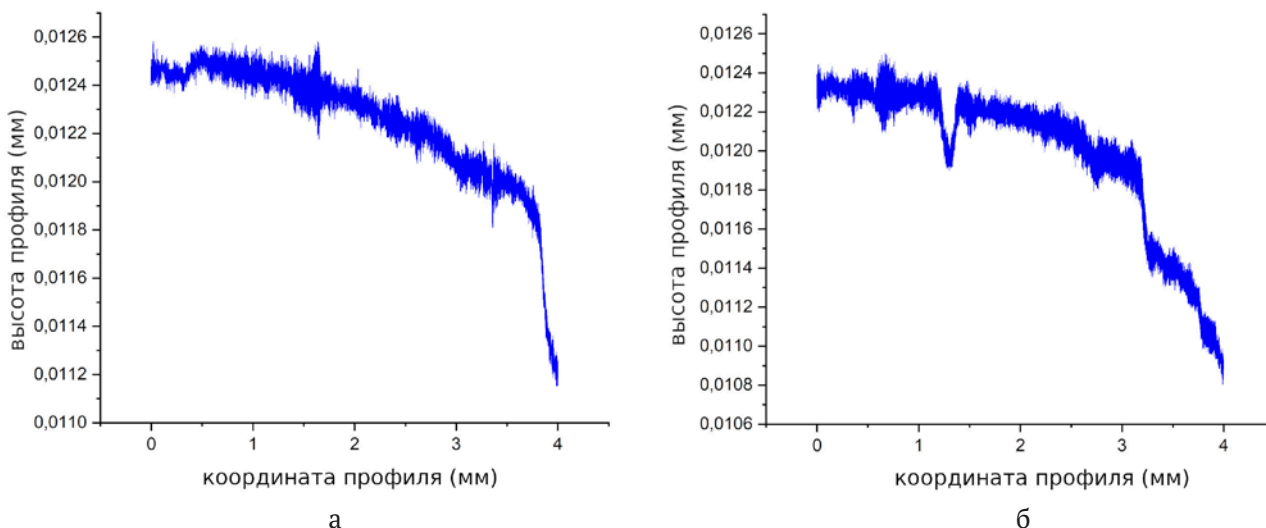


Рис. 2. Рельеф поверхности слоя  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$  (а) сечение в направлении OX, (б) сечение в направлении OY

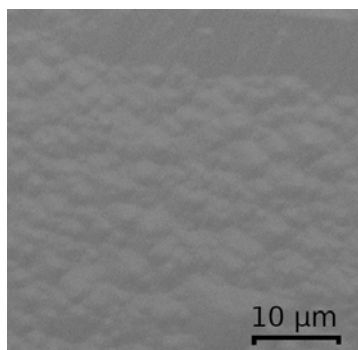


Рис. 3. СЭМ-изображение HVPE-слоя  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$

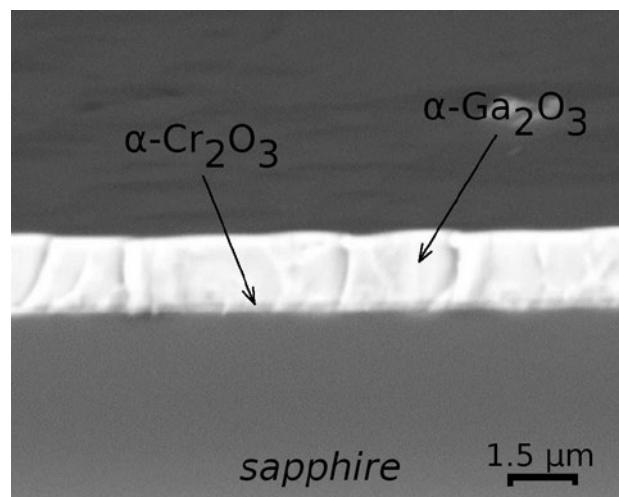


Рис. 4. СЭМ-изображение гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\text{сапфир}$

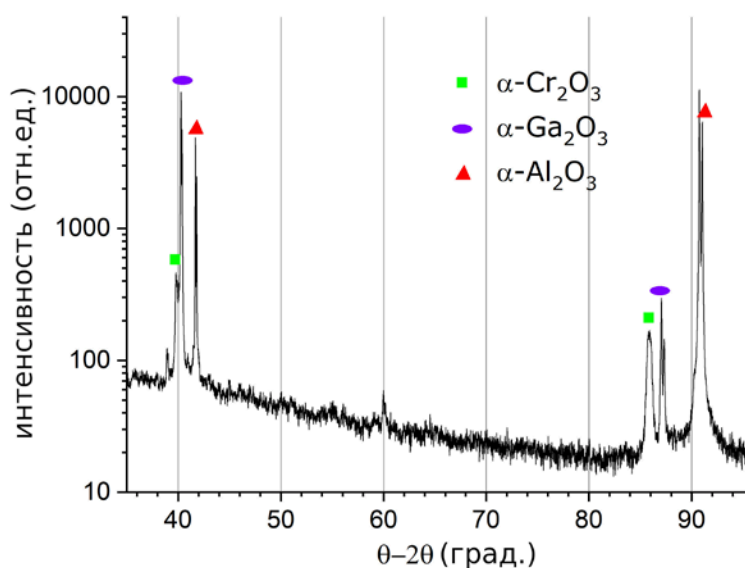


Рис. 5. Рентгенограмма гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\text{сапфир}$

экспериментальные значения существенно отличаются от табличных (рефлекс 0 0 0 6 — при 38.96 град, рефлекс 0 0 0 12 — при 83.66 град. Поскольку оба значения сдвинуты в сторону больших углов, это свидетельствует об уменьшении параметра решетки данной фазы относительно табличного. Можно сделать вывод, что слой  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , будучи буферным, находится в напряженном состоянии из-за несоответствия его решетки с решетками соседних слоев.

В итоге, используя буферный слой оксида хрома, нам удалось вырастить однородный слой оксида галлия толщиной 1.5 мкм с относитель-

но гладкой поверхностью. Полученный слой  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  имеет монофазную структуру сравнительно высокого совершенства.

#### 4. Заключение

Таким образом, была продемонстрирована возможность создания гетероструктуры  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\text{сапфир}$  заданной толщины и превосходной морфологией методами CVD. Технологии mist-CVD и HVPE позволили достичь высоких темпов роста слоев. Рентгенограммы показали отсутствие каких-либо других фаз, кроме корундоподобных.

Дальнейшие исследования планируется сосредоточить на измерении электрических параметров данной гетероструктуры и утонении слоя сапфира. Это позволит создать подложку с высокой теплопроводностью и использовать такую гетероструктуру для различных применений.

### 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.

### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Список литературы

1. Hasan M. N., Swinnich E., Seo J. H. Recent progress in gallium oxide and diamond based high power and high-frequency electronics. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. 2019;28(01n02): 1940004. <https://doi.org/10.1142/S0129156419400044>
2. Yadava N., Chauhan R. K. Review—recent advances in designing gallium oxide MOSFET for RF application. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2020;9(6): 065010. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/aba729>
3. Qiao R., Zhang H., Zhao S., Yuan L., Jia R., Peng B., Zhang Y. A state-of-art review on gallium oxide field-effect transistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022;55(38): 383003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac7c44>
4. Stepanov S. I., Nikolaev V., Bougrov V. E., Romanov A. Gallium oxide: properties and applications - a review. *Review. Advanced Materials Science*. 2016;44: 63–86. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wsoxph>
5. Pearton S. J., Aitkaliyeva A., Xian M., ... Kim J. Review – radiation damage in wide and ultra-wide bandgap semiconductors. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2021;10: 055008. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abfc23>
6. Oshima Y., Ahmadi E. Progress and challenges in the development of ultra-wide bandgap semiconductor  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toward realizing power device applications. *Applied Physics Letters*. 2022;121(26): 260501. <https://doi.org/10.1063/5.0126698>
7. Ping L. K., Berhanuddin D. D., Mondal A. K., Menon P. S., Mohamed M. A. Properties and perspectives of ultrawide bandgap Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in optoelectronic applications. *Chinese Journal of Physics*. 2021;73: 195–212. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2021.06.015>
8. Jiao T., Li Z., Chen W., Dong X., Li Z., Diao Z., Zhang Y., Zhang B. Stable electron concentration Si-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films homoepitaxial growth by MOCVD. *Coatings*. 2021;11: 589. <https://doi.org/10.3390/coatings11050589>
9. Kaneko K., Fujita S., Shinohe T., Tanaka K. Progress in  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for practical device applications. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2023;62: SF0803. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/acd125>
10. Kan S., Takemoto S., Kaneko K., Takahashi I., Sugimoto M., Shinohe T., Fujita S. Electrical properties of  $\alpha$ -Ir<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> *pn* heterojunction diode and band alignment of the heterostructure. *Applied Physics Letters*. 2018;113: 212104. <https://doi.org/10.1063/1.5054054>
11. Kaneko K., Nomura T., Fujita S. Corundum-structured  $\alpha$ -phase Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alloy system for novel functions. *Physica Status Solidi C*. 2010;7(10): 2467–2470. <https://doi.org/10.1002/pssc.200983896>
12. Abdullah M. M., Rajab Fahd M., Al-Abbas Saleh M. Structural and optical characterization of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures: Evaluation of its dielectric properties. *AIP Advances*. 2014;4(2): 027121. <https://doi.org/10.1063/1.4867012>
13. Stepanov S., Nikolaev V., Almaev A., ... Polyakov A. HVPE growth of corundum-structured  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on sapphire substrates with  $\alpha$ -Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layer. *Materials Physics and Mechanics*. 2021;47: 577–581. [https://doi.org/10.18149/MPM.4742021\\_4](https://doi.org/10.18149/MPM.4742021_4)
14. Yang D., Kim B., Eom T. H., Park Y., Jang H. W. Epitaxial growth of alpha gallium oxide thin films on sapphire substrates for electronic and optoelectronic devices: Progress and perspective. *Electronic Materials Letters*. 2022;18: 113–128. <https://doi.org/10.1007/s13391-021-00333-5>
15. Nikolaev V. I., Polyakov A. Y., Stepanov S. I., Pechnikov A. I., Guzilova L. I., Scheglov M. P., Chikiryaka A. V. Epitaxial stabilization of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers grown on r-plane sapphire. *Materials Physics and Mechanics*. 2023;51(1): 1–9. [https://doi.org/10.18149/MPM.5112023\\_1](https://doi.org/10.18149/MPM.5112023_1)
16. Oda M., Kaneko K., Fujita S., Hitora T. Crack-free thick (~5  $\mu$ m)  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films on sapphire substrates with  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layers. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2016;55(12): 1202B4. <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.1202B4>
17. Kim K.-H., Ha M.-T., Kwon Y.-J., Lee H., Jeong S.-M., Bae S.-Y. Growth of 2-inch  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epilayers via rear-flow-controlled mist chemical vapor deposition. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2019;8(7): Q3165. <https://doi.org/10.1149/2.0301907jss>
18. Cheng Y., Xu Y., Li Z., Zhang J., ... Zhang C. Heteroepitaxial growth of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on a-, c- and r-plane sapphire substrates by low-cost mist-CVD method. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;831(5): 154776. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154776>

19. Cha A. N., Bang S., Rho H., ... Ha J. S. Effects of nanoepitaxial lateral overgrowth on growth of  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  by halide vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2019;115(9): 091605. <https://doi.org/10.1063/1.5100246>

20. Николаев В. И., Тимашов Р. В., Степанов А. И., ... Поляков А. Я. Тонкие монокристаллические слои  $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ , выращенные на подложках сапфира в реакторе ультразвуковой паровой химической эпитаксии. *Письма в ЖТФ*. 2023;49(10): 43–46. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.10.55434.19549>

### Информация об авторах

*Бутенко Павел Николаевич*, к. т. н., с. н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1364-3016>  
pavel.butenko@mail.ioffe.ru

*Тимашов Роман Борисович*, н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9103-545X>  
timashov@inbox.ru

*Андрей Иванович Степанов*, д. х. н., с. н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2908-0385>  
stepanoffai@yandex.ru

*Алексей Иванович Печников*, н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-4604-1935>  
alpechn@yahoo.com

*Чикиряка Андрей Владимирович*, н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2087-8086>  
chikiryaka@mail.ru

*Любовь Игоревна Гузилова*, н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-4205-3226>

*Сергей Иванович Степанов*, к. ф.-м. н., н. с., ООО «Совершенные Кристаллы» (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

s.i.stepanov@gmail.com

*Николаев Владимир Иванович*, к. ф.-м. н., в. н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5630-0833>  
nikolaev.v@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 20.09.2023; одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 16.10.2023; опубликована онлайн 25.12.2023.