

07.2

## Свойства резистивных структур на основе полиморфных фаз оксида галлия

© В.М. Калыгина<sup>1</sup>, В.И. Николаев<sup>2</sup>, А.В. Алмаев<sup>1</sup>, А.В. Цымбалов<sup>1</sup>, Ю.С. Петрова<sup>1</sup>, И.А. Печников<sup>3</sup>, П.Н. Бутенко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> ООО „Совершенные кристаллы“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kalygina@ngs.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 30 мая 2020 г.

Принято к публикации 30 мая 2020 г.

Рассмотрено влияние УФ-излучения и сильного электрического поля на вольт-амперные характеристики резистивных структур на основе полиморфных пленок оксида галлия ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ). Пленки  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  осаждались методом хлоридной газофазной эпитаксии (HVPE) на гладкие и структурированные сапфировые подложки с базисной ориентацией (0001). На гладких подложках растут пленки  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , а на структурированных — пленки оксида галлия, содержащие  $\alpha$ - и  $\varepsilon$ -фазы. В структурах металл/ $\text{Ga}_2\text{O}_3$ /металл на основе двухфазных пленок обнаружен эффект переключения. При воздействии излучения с  $\lambda = 254$  nm и сильного электрического поля структуры переходят из состояния с низким сопротивлением в состояние с высоким сопротивлением.

**Ключевые слова:** оксид галлия, пленки, HVPE, полиморфизм, ультрафиолет, солнечно-слепые структуры.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49891.18341

Оксид галлия является бинарным полупроводниковым соединением, которое может кристаллизоваться в пяти модификациях:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и  $\varepsilon$  [1–3]. Благодаря своим физико-химическим свойствам этот широкозонный полупроводник представляет практический интерес для создания солнечно-слепых детекторов УФ-диапазона, высоковольтных приборов, газовых сенсоров, прозрачных электродов и т.д. [4]. На данный момент наиболее изученным является  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ( $E_g \sim 4.8$  eV) благодаря его высокой термической и химической стабильности [5–7].  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  обладает моноклинной решеткой, параметры которой имеют большое расхождение с другими полупроводниковыми кристаллами, такими как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Si, SiC и др. Это осложняет рост высококачественных слоев  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , включая эпитаксиальный, на этих подложках [8]. Политип  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , имеющий структуру корунда и характеризующийся небольшой разницей в постоянных кристаллической решетки с сапфиром ( $\Delta c/c = 3.3\%$  и  $\Delta a/a = 4.5\%$ ), кристаллизуется на его поверхности в слоях высокого структурного совершенства [9]. Отметим, что  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  обладает наибольшим значением ширины запрещенной зоны (5.1–5.3 eV) [10], что позволяет рассматривать его в качестве перспективы для создания солнечно-слепых детекторов в диапазоне глубокого УФ.

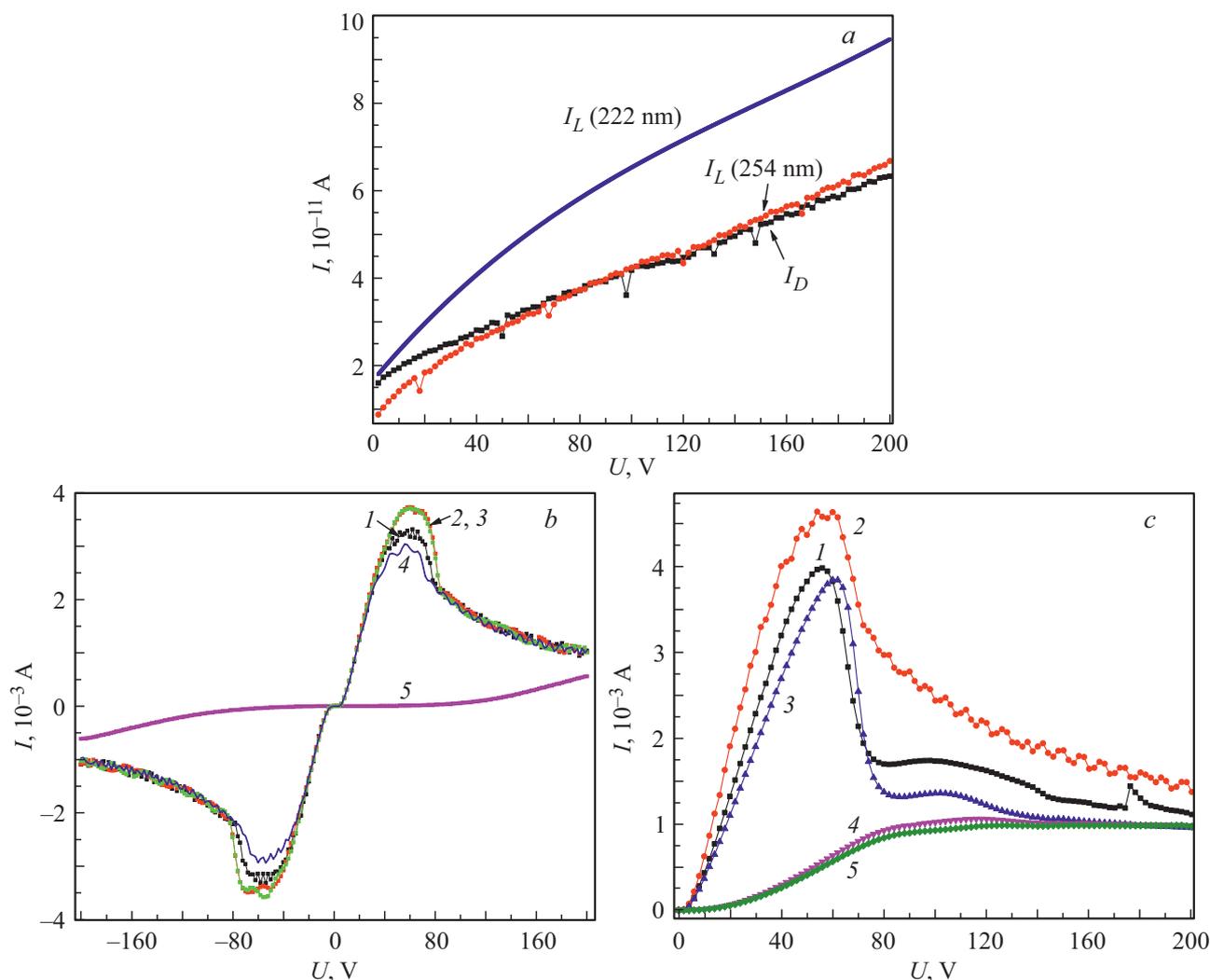
Эпитаксиальные пленки оксида галлия  $n$ -типа проводимости, легированные оловом, выращивались методом хлоридной газофазной эпитаксии (HVPE) в реакторе ООО „Совершенные кристаллы“. Для осаждения использовались гладкие и структурированные сапфировые подложки (PSS) с ориентацией (0001). В одном ростовом процессе на гладких подложках были полу-

чены слои чистой фазы  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , а на профилированных — двухфазные слои с колончатыми структурами  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3/\varepsilon$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  [11,12]. Цель настоящей работы — изучить особенности электрических и фотоэлектрических характеристик тонких слоев оксида галлия в зависимости от структуры подложки.

Для измерения электрических характеристик на поверхности слоев оксида галлия посредством магнетронного напыления через шаблон формировались платиновые контакты, расстояние между которыми  $d = 1.85$  mm. Затем пластины разрезались на отдельные чипы размером  $1.85 \times 1$  mm. Полученные образцы распаивали в корпуса марки ТО-8.

Темновые вольт-амперные и фотоэлектрические характеристики измерялись при комнатной температуре с помощью источника-измерителя Keithley 2611. В качестве источника УФ-излучения использовались лампа VL-6 с фильтром, обеспечивающая максимум излучения при  $\lambda = 254$  nm, и эксимерная KгCl-лампа с  $\lambda = 222$  nm. Структуры, сформированные на гладких подложках, имели темновые токи ( $I_D$ ), не превышающие 10–70 pA при напряжениях от 0 до  $\pm 200$  V. Значения тока при воздействии излучения ( $I_L$ ) с  $\lambda = 254$  nm практически не отличались от темновых, в то время как при облучении с  $\lambda = 222$  nm наблюдалось увеличение электропроводности образцов (рис. 1, а).

Одной из причин отсутствия отклика образцов на излучение с  $\lambda = 254$  nm может быть несколько бóльшая ширина запрещенной зоны оксидной пленки, выращенной на гладкой сапфировой подложке. При использовании источника с  $\lambda = 222$  nm квант энергии излучения

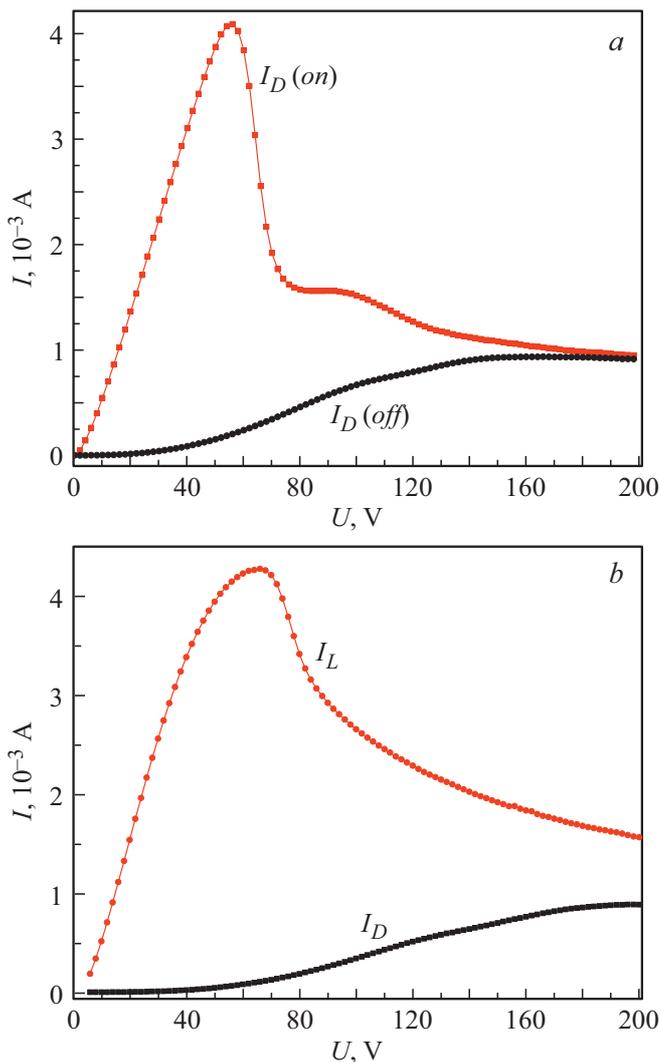


**Рис. 1.** *a* — вольт-амперные характеристики образца  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ , полученного на гладкой сапфировой подложке: темновой ток ( $I_D$ ) и токи при воздействии УФ ( $\lambda = 254$  и  $222$  nm) ( $I_L$ ). *b* — вольт-амперные характеристики двухфазного образца  $\alpha\text{-}\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ , полученного на структурированной сапфировой подложке в интервале  $-200 \leq U \leq +200$  V: *1* — исходная темновая ВАХ; *2, 3* — ВАХ при воздействии УФ; *4* — темновая ВАХ после выключения УФ; *5* — темновая ВАХ после воздействия сильного электрического поля. *c* — влияние электрического поля и УФ-излучения на ВАХ структур металл/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{металл}$ : *1* — исходная темновая ВАХ; *2* — ВАХ при воздействии УФ; *3* — темновая ВАХ после выключения УФ; *4, 5* — темновые ВАХ после воздействия сильного электрического поля.

равен  $5.06$  eV и близок к краю собственного поглощения, а при  $\lambda = 254$  nm составляет  $h\nu = 4.88$  eV, что меньше указанного выше значения  $E_g$  для  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ .

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) слоев на структурированных подложках симметричны относительно полярности напряжения  $U$  в интервале  $-200 \leq U \leq +200$  V (рис. 1, *b*). Исходные темновые ВАХ (до воздействия сильных электрических полей и УФ-излучения) имеют вид кривых с максимумом (рис. 1, *b, c*, кривые *1*). При подаче смещения на образцы темновой ток  $I_D$  увеличивается и достигает максимального значения при  $U_m = 50 - 70$  V. Дальнейшее повышение напряжения приводит к резкому снижению  $I_D$ , и при напряжениях выше  $80 - 100$  V наблюдается сравнительно слабая зависимость темнового тока от напряжения. Во

время действия источника с  $\lambda = 254$  nm зависимость  $I$  от  $U$  по-прежнему имеет выраженный максимум, и ток при освещении  $I_L$  незначительно превосходит темновой  $I_D$  (рис. 1, *c*, кривые *1, 2*). После выключения УФ повышенные значения  $I_D$  сохраняются в течение нескольких суток, если на образцы не подавать высокое напряжение (рис. 1, *c*, кривая *3*). Однако если на образец подать смещение, примерно равное  $100 - 200$  V, то характер темновой вольт-амперной характеристики резко изменится: на кривой зависимости  $I$  от  $U$  исчезает максимум и темновой ток при низких напряжениях снижается на два порядка (рис. 1, *c*, кривые *4, 5*); ВАХ описываются монотонной зависимостью тока от напряжения; образец переходит в состояние с высоким сопротивлением (BC). На рис. 2, *a* приведены темновые ВАХ одного



**Рис. 2.** *a* — эффект переключения в структурах металл/ $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/металл: *on* — состояние с низким сопротивлением, *off* — состояние с высоким сопротивлением. *b* — влияние УФ-излучения на ВАХ после переключения образца в состояние с высоким сопротивлением.

из образцов до и после воздействия УФ-излучения и сильного электрического поля, показывающие эффект переключения образца из состояния с низким сопротивлением в состояние с ВС. После переключения структуры обнаруживают высокую чувствительность к УФ-излучению в интервале  $-60 \leq U \leq +60$  В (рис. 2, *b*).

Большие начальные значения темновых токов в образцах на PSS могут быть связаны с присутствием двух политипов оксида галлия, где в случае полярной фазы  $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> возможно образование областей двумерного электронного газа (2DEG) [13].  $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет сегнетоэлектрические свойства [14], вектор спонтанной поляризации ориентирован вдоль направления оси роста [0001] (ось *c*). Под действием сильного электрического поля поляризация может изменять направление на противоположное. Снижение тока при  $U > U_m$ , вероятно, вызвано

нарушением условий существования 2DEG, возможно за счет изменения вектора спонтанной поляризации  $\mathbf{P}_{sp}$ . В результате структура переходит из проводящего состояния в состояние с высоким сопротивлением.

Чувствительность к УФ-излучению с  $\lambda = 254$  nm двухфазных слоев на PSS-подложке, вероятно, обусловлена тем, что  $\epsilon$ -фаза Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет меньшую ширину запрещенной зоны по сравнению с  $\alpha$ -фазой. Подводя итог, можно сделать следующие выводы.

1. Электрические и фотоэлектрические характеристики эпитаксиальных пленок Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенных HVPE-методом, зависят от их структуры, которая в свою очередь определяется профилем сапфировой подложки.
2. В двухфазных образцах с  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выявлен эффект переключения под влиянием электрического поля из состояния с низким сопротивлением в состояние с ВС.
3. Чувствительность к УФ-излучению в структурах с двухфазной пленкой оксида галлия появляется только после переключения в ВС-состояние.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Lee S.-D., Ito Y., Kaneko K., Fujita S. // Jpn. J. Appl. Phys. 2015. V. 54. P. 030301. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.030301>
- [2] Dakhel A.A. // Solid State Sci. 2013. V. 20. P. 54–58. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2013.03.009>
- [3] Stepanov S.I., Nikolaev V.I., Bougrov V.E., Romanov A.E. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2015. V. 44. P. 63–86.
- [4] Cora I., Mezzadri F., Boschi F., Bosi M., Caplovicova M., Calestani G., Dodony I., Pecza B., Fornari R. // CrystEngComm. 2017. V. 19. P. 1509–1516. <https://doi.org/10.1039/C7CE00123A>
- [5] Guo D., Qin X., Lv M., Shi H., Su Y., Yao G., Wang S., Li C., Li P., Tang W. // Electron. Mater. Lett. 2017. V. 13. P. 483–488. <https://doi.org/10.1007/s13391-017-7072-y>
- [6] Qian L., Wu Z., Zhang Y., Lai P., Liu X., Li Y. // ACS Photon. 2017. V. 4. P. 2203–2211. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b00359>
- [7] Roberts J.W., Chalker P.R., Ding B., Oliver R.A., Gibbon J.T., Jones L.A.H., Dhanak V.R., Phillips L.J., Major L.J., Massabuau F.C. // J. Cryst. Growth. 2019. V. 528. P. 125254. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125254>
- [8] Xia X., Chen Y., Feng Q., Liang H., Tao P., Xu M., Du G. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. P. 202103. <https://doi.org/10.1063/1.4950867>
- [9] Son H., Choi Y., Hwang J., Jeon D. // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2019. V. 8. P. Q3024–Q3027. <https://doi.org/10.1149/2.0051907jss>
- [10] Xu Y., Zhang C., Cheng Y., Li Z., Cheng Y., Feng Q., Chen D., Zhang J., Hao Y. // Materials. 2019. V. 12. P. 3670. <https://doi.org/10.3390/ma12223670>

- [11] *Nikolaev V.I., Pechnikov A.I., Nikolaev V.V., Scheglov M.P., Chikiryaka A.V., Stepanov S.I., Medvedev O.S., Shapenkov S.V., Ubyivok E.V., Vyvenko O.F.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1400. P. 055049.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055049>
- [12] *Shapenkov S., Vyvenko O., Ubyivok E., Medvedev O., Varygin G., Chikiryaka A., Pechnikov A., Scheglov M., Stepanov S., Nikolaev V.* // *Phys. Status Solidi A*. First published: 14 February 2020. P. 1900892.  
<https://doi.org/10.1002/pssa.201900892>
- [13] *Cho S.B., Mishra R.* // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. P. 162101. <https://doi.org/10.1063/1.5019721>
- [14] *Mezzadri F., Calestani G., Boschi F., Delmonte D., Bosi M., Fornari R.* // *Inorgan. Chem.* 2016. V. 55. P. 12079–12084.  
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b02244>