

# Солнечно-слепые детекторы УФ-излучения на основе пленок $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

© В.М. Калыгина, А.В. Алмаев, В.А. Новиков, Ю.С. Петрова

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

E-mail: Kalygina@ngs.ru

Поступила в Редакцию 5 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 11 февраля 2020 г.

Принята к публикации 11 февраля 2020 г.

Исследованы структуры резистивного типа на основе пленок оксида галлия. Пленки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> получали ВЧ-магнетронным распылением мишени  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.9999%) на не нагретые сапфировые подложки с предварительно нанесенными платиновыми электродами. Получены данные о структуре и фазовом составе пленок сразу после напыления и после отжига в аргоне при 900°C в течение 30 мин. Измерены темновые и вольт-амперные характеристики при воздействии излучения с  $\lambda = 254$  нм. Показано, что после отжига фототок увеличивается на порядок. Экспериментально подтверждено отсутствие чувствительности исследованных структур к излучению в видимом интервале длин волн ( $\lambda = 400$  нм).

**Ключевые слова:** пленки оксида галлия, термический отжиг, темновой ток, фототок.

DOI: 10.21883/FTP.2020.06.49388.9367

## 1. Введение

Фотоприемники глубокого ультрафиолетового (УФ) излучения имеют широкий спектр применения, включая датчики контроля пламени; устройства для отслеживания вспышек излучений боевых установок различного назначения, установление пространственной связи, мониторинг озоновых дыр и т.д. [1–3]. Первые твердотельные детекторы коротковолнового излучения в основном изготавливали на кремнии. Но эти детекторы охватывали только ближний интервал УФ-длин волн и не могли работать при высоких температурах. Для продвижения в коротковолновую часть спектра необходимо было использовать специально разработанные фильтры. Частично проблемы, связанные с детектированием излучения среднего и дальнего УФ-диапазонов, решаются за счет использования материалов с большей шириной запрещенной зоны.

Для этих целей обычно используют устройства на основе AlN с запрещенной зоной  $E_g = 6.3$  эВ, тройных соединений AlGaN [4], алмаза [5] и Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O [6]. Однако AlN и алмаз имеют слишком широкую запрещенную зону, чтобы обнаружить свет на протяжении всей УФ-области (100–280 нм). Кроме того, трудно приготовить высокого качества тройные соединения AlGaN с большим содержанием атомов Al [7]. Композиты с концентрацией Mg выше 37% содержат высокую концентрацию дефектов, постепенно деградируют во время эксплуатации и обнаруживают снижение отклика [8].

Поиски подходящих материалов для производства детекторов среднего и дальнего диапазонов УФ-излучения привели к металлоксидным соединениям (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, HgO<sub>2</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и т.д.) с шириной запрещенной  $E_g \geq 4$  эВ. Среди большого разнообразия широкозонных материалов оксид галлия оказывается одним из наиболее перспективных полупроводников для разработки детек-

торов УФ-излучения [9,10]. Среди пяти полиморфных фаз оксида галлия фаза  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является наиболее стабильной вплоть до температуры плавления 1800°C [11].

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет ширину запрещенной зоны 4.9 эВ и является перспективным материалом для фотоприемников УФ-излучения, если длина волны не превышает 280 нм. Такие фотоприемники известны как солнечно-слепые. В ряде работ приведены зависимости спектрального отклика на излучение от длины волны для структур на основе оксида галлия, полученных различными способами [12–14]. К настоящему времени опубликован ряд обзорных статей, описывающих способы получения объемных кристаллов и пленок  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, их свойства и характеристики различных устройств, изготовленных на этом материале [15–19]. Обобщая результаты большого количества исследований, можно сказать, что максимальная чувствительность таких детекторов наблюдается в диапазоне длин волн 230–250 нм, резкий спад чувствительности — при длинах волн  $> 250$  нм.

Известно, что электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе пленок оксида галлия зависят от способа изготовления, материала подложки, последующих технологических обработок. В данной статье приведены результаты исследований влияния УФ-излучения на структуры резистивного типа с пленками оксида галлия, полученными ВЧ-магнетронным напылением.

## 2. Методика эксперимента

Пленки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 150–200 нм наносили ВЧ-магнетронным распылением мишени  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.9999%) на не нагретые сапфировые подложки. Тонкие слои оксида галлия получали в газовой смеси Ar/O<sub>2</sub> на установке AUTO-500. Концентрация кислорода в смеси поддерживалась равной  $(56.1 \pm 0.5)$  об%.

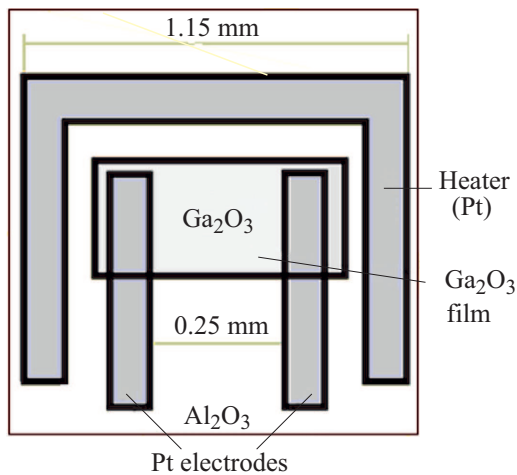


Рис. 1. Схематическое изображение образца.

Расстояние между мишенью и подложкой составляло 70 мм. Давление в камере во время напыления не превышало  $7 \cdot 10^{-3}$  бар.

Перед нанесением оксидной пленки сапфировые подложки подвергались химической очистке с последующим формированием с помощью фотолитографии платиновых электродов и нагревателя для проведения температурных измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученных образцов. Пленки  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  фиксированной площади  $S_k = 1.56 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$  формировали, используя взрывную фотолитографию. Сапфировую подложку с полученными образцами разрезали на две части: одну половину подложки оставляли без обработки, а вторую подвергали термическому отжигу в аргоне при температуре  $900^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Затем каждую часть подложки разрезали на отдельные образцы размером  $1.15 \times 1.15 \text{ мм}$ . Вид планарной структуры на сапфировой подложке показан на рис. 1.

Структуру и фазовый состав пленок определяли с помощью рентгеновского дифрактометра Lab-X XRD 6000 Shimadzu X-ray. Для анализа поверхности слоев оксида галлия использовали атомный силовой микроскоп (ACM) Solver HV AFM.

Измерения темновых вольт-амперных характеристик и фотоэлектрических характеристик проводили при комнатной температуре с помощью источника измерения Keithley 2611. В качестве источника УФ-излучения использовали лампу VL-6 с фильтром, обеспечивающим длину волны  $\lambda = 254 \text{ нм}$ , оптическая мощность излучения  $7 \text{ мВт/см}^2$ . Для проверки влияния видимого излучения использовали светодиод с  $\lambda = 400 \text{ нм}$ .

### 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследования методом рентгеновского дифракционного анализа показали, что оксидные пленки после

изготовления — поликристаллические и содержат кристаллиты  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (рис. 2, *a* из работы [20]). После отжига в пленке оставались только кристаллиты  $\beta$ -фазы (рис. 2, *b* из работы [20]).

Данные о морфологии поверхности исследуемых пленок, полученные с помощью атомного силового микроскопа, подтверждают поликристаллическую структуру полученных пленок (рис. 3 из работы [20]). После отжига размер кристаллитов увеличивался в 2 раза.

Темновые ВАХ резистивных структур металл/ $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ /металл описываются линейной зависимостью тока от напряжения и не зависят от полярности приложенного напряжения. С повышением температуры проводимость растет по экспоненциальному закону с энергией активации  $E_a = (0.98 \pm 0.02) \text{ эВ}$ . После отжига темновой ток  $I_D$  снижается в несколько раз (рис. 4).

Вольт-амперные характеристики во время действия излучения с  $\lambda = 254 \text{ нм}$  измеряли при мощности светового потока  $P = 7 \text{ мВт/см}^2$ . Фототок  $I_f$  определяли как разность тока, измеренного во время действия излучения  $I_L$ , и темнового тока  $I_D$ . На рис. 5 приведены зависимости фототоков от напряжения для образцов

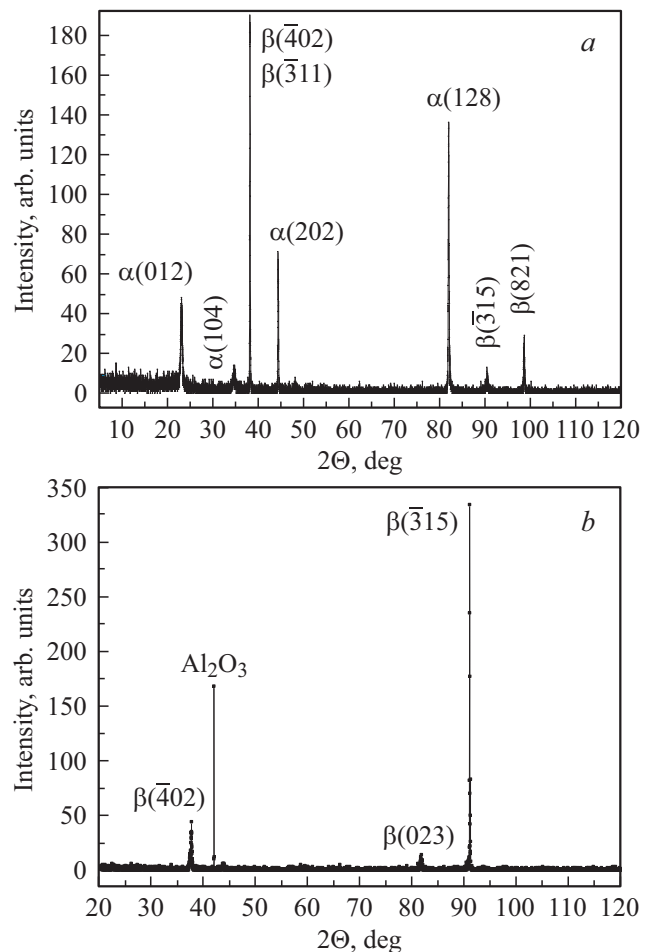
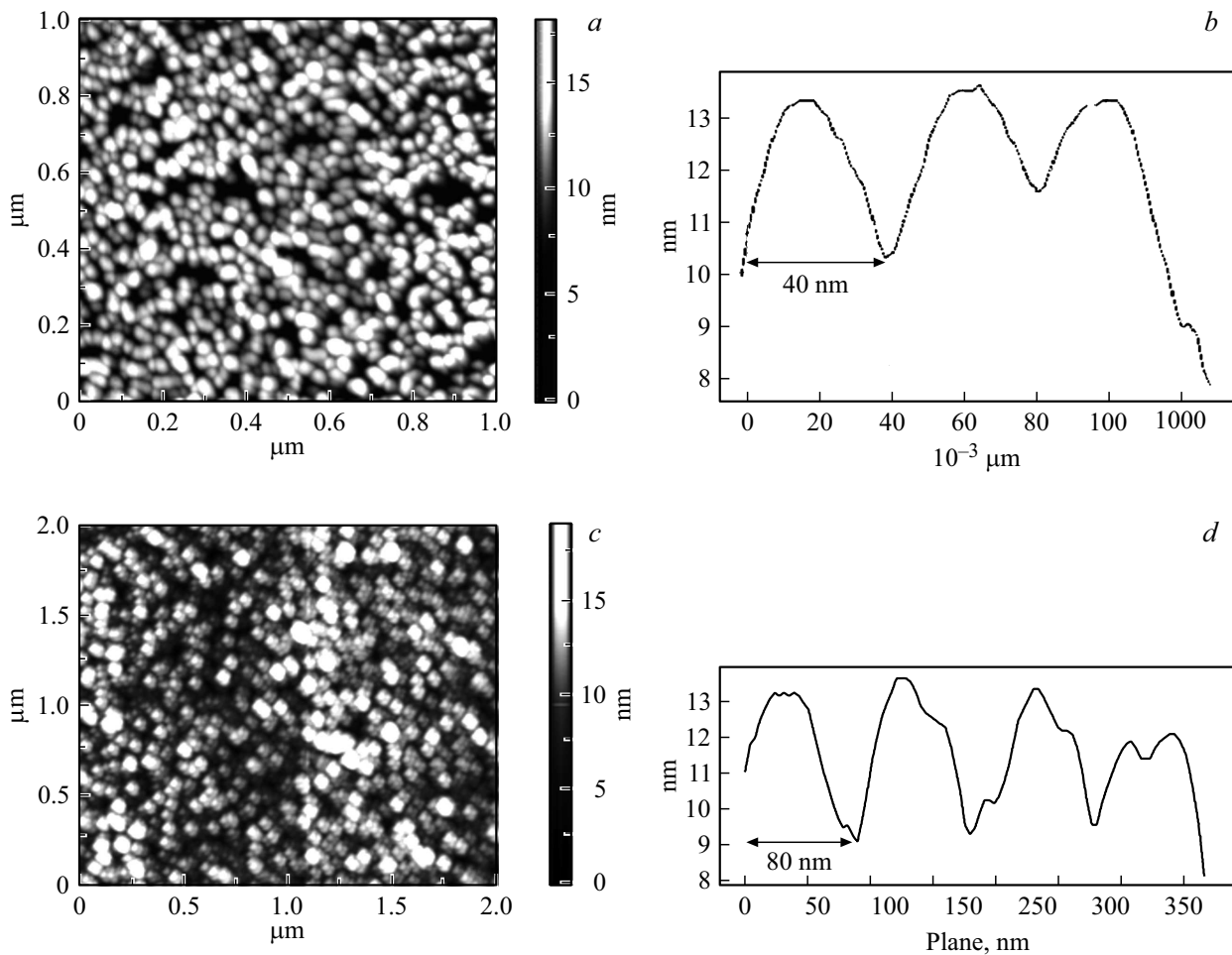
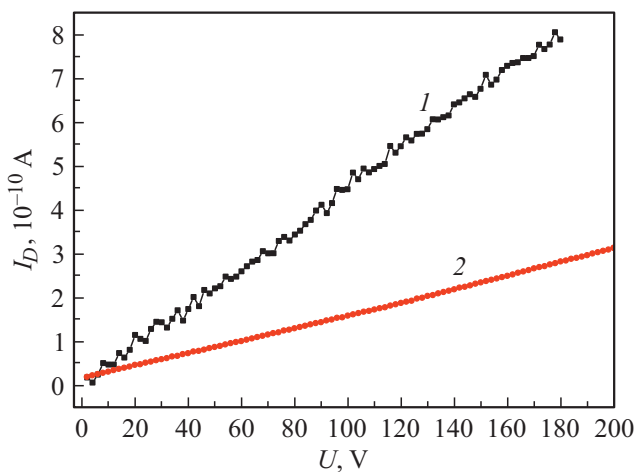


Рис. 2. Спектры рентгеновской дифракции пленок оксида галлия: *a* — до отжига, *b* — после отжига в атмосфере Ar при  $900^\circ\text{C}$ .



**Рис. 3.** Поверхность оксидной пленки: двумерное изображение (a) и размер кристаллитов (профиль среза) (b) пленок до отжига; двумерное изображение (c) и размер кристаллитов (профиль среза) (d) пленок после отжига при  $900^\circ\text{C}$ .

до (кривая 1) и после отжига при  $900^\circ\text{C}$  (кривая 2). Анализ полученных данных показал, что отжиг пленок  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  приводит к возрастанию фототока больше чем на



**Рис. 4.** Темновые вольт-амперные характеристики структур с пленкой  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  до (1) и после отжига при  $900^\circ\text{C}$  (2).

порядок. Так как значения темнового тока в результате отжига уменьшаются в несколько раз, то рост  $I_f$  после термообработки связан не только с уменьшением значений  $I_D$ , но и с изменениями условий генерации электронно-дырочных пар в отожженной пленке оксида галлия. В свою очередь рост генерации электронно-дырочных пар в  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  после отжига вызван структурно-фазовыми изменениями в оксидной пленке, что подтверждается данными рис. 2 и 3.

Спектральная зависимость фототока описывается кривой с максимумом при  $\lambda = 230$  нм (рис. 6). При напряжениях 10 и 100 В фототок мал и не зависит от длины волны в видимом диапазоне и в ближнем УФ. При  $\lambda \leq 270$  нм ток растет и достигает максимума при  $\lambda = 230$  нм.

Токовую спектральную чувствительность  $S_{I\lambda}$  рассчитывали с помощью калиброванного кремниевоего фото диода ФДУК-2УТ по формуле [3]

$$S_{I\lambda} = \frac{I_L \cdot S_K^* \cdot S_{I\lambda}^K}{I_L^* \cdot S_K}, \quad (1)$$

где  $I_L$  — ток структуры во время действия излучения,  $S_K^*$  и  $S_{I\lambda}^K$  — площадь и токовая чувствительность

кремниевого фотодиода на длине волны  $\lambda = 254$  нм,  $I_f^*$  — ток фотодиода. Для исследованных образцов  $S_{IL} = 0.2$  А/Вт. Удельная обнаружительная способность,

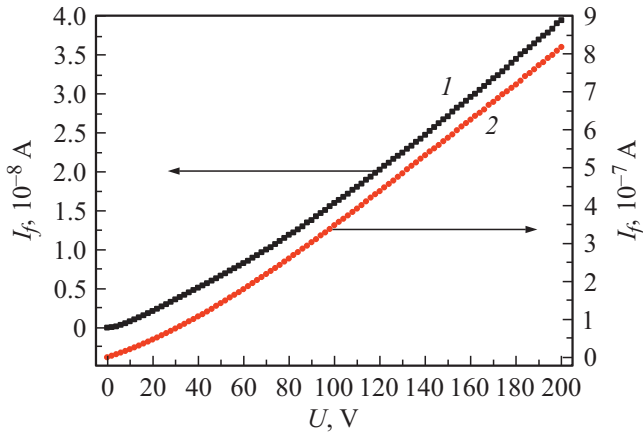


Рис. 5. Зависимость фототока  $I_f$  от напряжения для образцов до (1) и после (2) отжига.

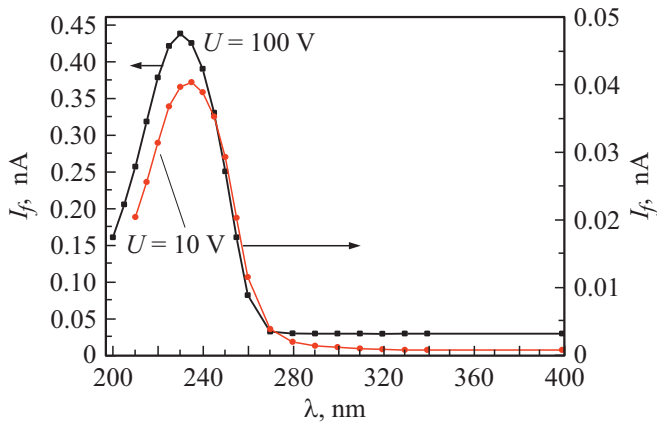


Рис. 6. Спектральная зависимость фототока структуры с пленкой  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ .

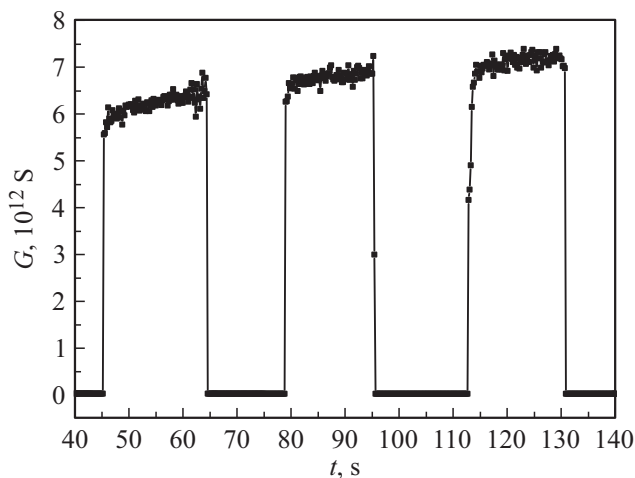


Рис. 7. Временные зависимости проводимости  $G$  структуры металл/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /металл при включении и выключении источника излучения с  $\lambda = 254$  нм,  $U = 50$  В.

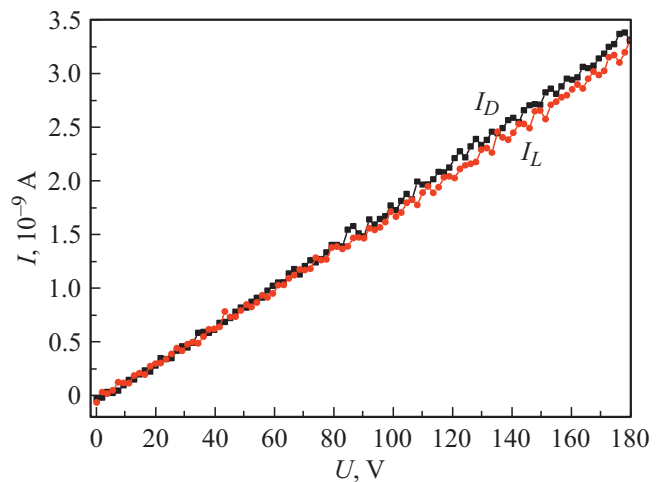


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики структуры с пленкой  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ : темновая ( $I_D$ ) и при воздействии излучения с  $\lambda = 400$  нм ( $I_L$ ).

рассчитанная по формуле

$$D^* = \frac{en\lambda}{hc} \sqrt{\frac{S_k}{2eI_D}}, \quad (2)$$

составляет  $3.7 \cdot 10^{11}$  Гц<sup>1/2</sup> · см/Вт.

На рис. 7 показана временная зависимость проводимости  $G$  одного из образцов при включении и выключении источника излучения с  $\lambda = 254$  нм. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что нарастание и спад  $G$  не превышают нескольких секунд и в основном определяются инерционностью источника излучения.

Для проверки факта, что структуры металл/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /металл не обнаруживают отклик в видимом интервале длин волн, были проведены измерения вольт-амперных характеристик при воздействии излучения с  $\lambda = 400$  нм. На рис. 8 приведены зависимости тока от напряжения без (кривая  $I_D$ ) и при освещении (кривая  $I_L$ ) с  $\lambda = 400$  нм. Отсутствие изменений тока в интервале напряжений  $0 \leq U \leq 180$  В и рост тока при воздействии излучения с  $\lambda = 254$  нм подтверждают возможность использования данных структур в качестве солнечно слепых детекторов УФ-излучения.

#### 4. Заключение

Исследованы структуры резистивного типа на основе пленок оксида галлия, полученных ВЧ-магнетронным распылением мишени  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  в аргон/кислородной смеси. Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

1. Пленки оксида галлия обнаруживают чувствительность к глубокому УФ-излучению ( $\lambda = 254$  нм).
2. Установлено влияние отжига в аргоне при  $900^\circ\text{C}$  на чувствительность сенсоров к УФ-излучению. После отжига фототок увеличивается более чем на порядок.

Повышение чувствительности образцов к УФ-излучению после отжига объясняется структурно-фазовыми изменениями оксидной пленки.

3. Отсутствие чувствительности пленок Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> к излучению с  $\lambda = 400$  нм доказывает, что полученные детекторы являются солнечно-слепыми.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке грантами RSF # 18-44-06001 (ТГУ, Россия) и HRSF-0004 (DESY, Германия).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] E. Monroy, F. Omnes, F. Calle. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, 33 (2003).
- [2] Z.Y. Xu, B.M. Sadler. *IEEE Commun. Mag.*, **46**, 67 (2008).
- [3] S. Aslam, F. Yan, D.E. Pugel, D. Franz, L. Miko, F. Herrero, M. Matsumara, S. Babu, C.M. Stahle. *Proc. SPIE*, **5901**, 59011J-1 (2005).
- [4] Z.G. Shao, D.J. Chen, H. Lu, R. Zhang, D.P. Cao, W.J. Luo, Y.D. Zheng, L. Li, Z.H. Li. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **35**, 372 (2014).
- [5] A. Balducci, M. Marinelli, E. Milani, M.E. Morgada, A. Tucciarone, G. Verona-Rinati, M. Angelone, M. Pillon. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 193509 (2005).
- [6] J. Yu, C.X. Shan, J.S. Liu, X.W. Zhang, B.H. Li, D.Z. Shen. *Phys. Status Solidi RRL*, **7**, 425 (2013).
- [7] K. Balakrishnan, A. Bandoh, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, L307 (2007).
- [8] W. Yang, S.S. Hullavarad, B. Nagaraj, I. Takeuchi, R.P. Sharma, T. Venkatesan, R.D. Vispute, H. Shen. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3424 (2003).
- [9] Y. Tamm, P. Reiche, D. Klimm, T. Fukuda. *J. Cryst. Growth*, **220**, 510 (2000).
- [10] E. Ohba, T. Kobayashi, M. Kado, K. Hoshikawa. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 1202bf (2016).
- [11] H. He, R. Orlando, M.A. Blanco, R. Pandey, E. Amzallag, I. Baraille, M. Rérat. *Phys. Rev.*, **74**, 195123 (2006).
- [12] R. Suzuki, S. Nakagomi, Y. Kokubun, N. Arai, S. Ohira. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 222102 (2009).
- [13] S. Nakagomi, T. Momo, S. Takahashi, Y. Kokubun. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 072105 (2013).
- [14] S. Oh, Y. Jung, M.A. Mastro, J.K. Hite, C.R. Eddy, jr., J. Kim. *Opt. Express*, **23** (22), 28300 (2015).
- [15] S.I. Stepanov, V.I. Nikolaev, V.E. Bougrov, A.E. Romanov. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **44**, 63 (2016).
- [16] M.J. Tadjer, M.A. Mastro, N.A. Mahadik, M. Currie, V.D. Wheeler, J.A. Freitas, jr., J.D. Greenlee, J.K. Hite, K.D. Hobart, C.R. Eddy, jr., F.J. Kub. *J. Electron. Mater.*, **45**, 2031 (2016).
- [17] S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, M.A. Mastro. *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 011301 (2018).
- [18] X. Chen, F. Ren, S. Gu, J. Ye. *Photon. Research*, **7** (4), 381 (2019).

[19] Y. Qin, S. Long, H. Dong, Q. He, G. Jian, Y. Zhang, X. Hou, P. Tan, Z. Zhang, H. Lv, Q. Liu, M. Liu. *Chinese Phys. B*, **28**, 018501 (2019).

[20] A. Tsybalov, J. Petrova. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **124**, 071004 (2018).

*Редактор А.Н. Смирнов*

### Solar-blind UV detectors based on $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films

*V.M. Kalygina, A.V. Almaev, V.A. Novikov, Yu.S. Petrova*

National Research Tomsk State University,  
634050 Tomsk, Russia

**Abstract** Resistive-type structures based on gallium oxide films were studied. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films were obtained by radio-frequency magnetron-assisted sputtering of a  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.9999%) target onto unheated sapphire substrates with pre-deposited platinum electrodes. The structure and phase composition of the gallium-oxide films were determined. The current-voltage characteristics of the samples without and with exposure to radiation at the wavelengths  $\lambda = 254$  nm were measured. It was shown that after annealing, the photocurrent increases by an order. The absence of sensitivity of the studied structures to radiation in the visible wavelength range was experimentally confirmed.