

# Фотодиоды на основе структур Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs, способные работать в автономном режиме

© В.М. Калыгина, О.С. Киселева, Б.О. Кушнарев, В.Л. Олейник, Ю.С. Петрова, А.В. Цымбалов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

E-mail: kalygina@ngs.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 28 июля 2022 г.

Принята к публикации 28 июля 2022 г.

Исследованы электрические и фотоэлектрические характеристики структур Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs. Пленку оксида галлия получали ВЧ магнетронным напылением на эпитаксиальные слои n-GaAs с концентрацией  $N_d = 9.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Толщина оксидной пленки равнялась 120 нм. Измерения на частоте 10<sup>6</sup> Гц показали, что вольт-фарадные и вольт-сименсные зависимости описываются кривыми, характерными для структур металл-диэлектрик-полупроводник и обнаруживают слабую чувствительность к излучению с  $\lambda = 254 \text{ нм}$ . При работе на постоянном сигнале образцы проявляют свойства фотодиода и способны работать в автономном режиме. Фотоэлектрические характеристики детекторов во время непрерывного действия излучения с  $\lambda = 254 \text{ нм}$  определяются высокой плотностью ловушек на границе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs и в объеме оксидной пленки.

**Ключевые слова:** МДП-структуры, вольт-фарадные характеристики, вольт-сименсные характеристики, фототок, плотность ловушек.

DOI: 10.21883/FTP.2022.09.53417.9868

## 1. Введение

Одним из перспективных направлений разработки детекторов коротковолнового излучения являются устройства, способные работать в автономном режиме. Фотодетекторы с автономным питанием имеют ряд преимуществ перед другими устройствами на основе широкозонных материалов, способных обнаруживать ультрафиолетовое излучение. Такие фотодетекторы имеют простое устройство и, что особо важно, предполагают прямую интеграцию с технологией изготовления структур металл-диэлектрик-полупроводник (MIS) [1]. К настоящему времени описано значительное количество исследований, связанных с изучением электрических и фотоэлектрических характеристик структур металл-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-полупроводник. В качестве полупроводниковой подложки использовали органические и неорганические материалы [2–9]. Электрические и оптические характеристики таких устройств определяются выбором полупроводника, технологией и режимом получения пленки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и технологическими приемами, используемыми для обработки оксидной пленки после ее нанесения на полупроводниковую подложку. В данном сообщении представлены результаты исследований электрических и фотоэлектрических характеристик структур, полученных ВЧ магнетронным напылением пленки оксида галлия на эпитаксиальные слои n-GaAs.

## 2. Методика эксперимента

В качестве подложки использовали эпитаксиальные слои n-GaAs с концентрацией  $N_d = 9.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Эпи-

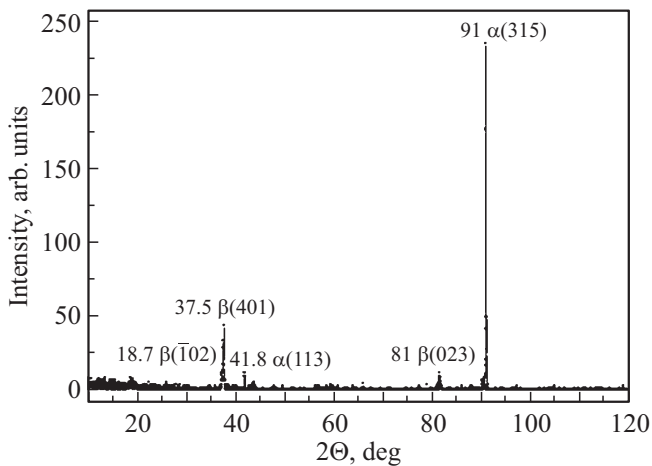
таксиальные слои электронного арсенида галлия толщиной 12 мкм выращивали на пластинах монокристаллического GaAs(100). Толщина буферного слоя n<sup>+</sup>-типа составляла 4.9 мкм. После нанесения оксидной пленки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs структуры отжигали в аргоне в течение 30 мин при температуре 900°C.

Фазовый состав пленки исследовали с помощью рентгено-дифракционного анализа (XDA) на установке „Lab-X XRD 6000 ShimadzuX-raydiffractometer“. Для исследования атомной структуры использовали рентгеновскую трубку с медным анодом. Рабочая длина волны 1.54 нм. Компьютерная обработка результатов проводилась в программе OriginPro8.

Для измерений электрических характеристик на поверхности Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и тыловую сторону полупроводниковой подложки наносили платиновые контакты. Контакт к полупроводнику напыляли в виде сплошной металлической пленки, а контакт к оксиду галлия создавали напылением металла через маски диаметром 1 мм. Площадь электрода к Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (затвор) составляла  $1.04 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

Темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ВАХ при воздействии ультрафиолетового излучения исследовали при комнатной температуре с помощью источника-измерителя Keithley 2611B. В качестве источника УФ-излучения использовалась криптон-фторовая лампа VL-6 с фильтром на 254 нм. Расстояние между лампой и образцом составляло 1 см, падающая интенсивность излучения равнялась 0.78 мВт/см<sup>2</sup>.

Измерение вольт-фарадных (ВФХ) и вольт-сименсных характеристик (ВСХ) полученных образцов проводилось на частоте 1 МГц. Для этой цели использовали измеритель E7-12 и специально разработанную приставку, позволяющую в одном цикле измерять вольт-фарадные



**Рис. 1.** Результаты XDA пленки оксида галлия после отжига в Ar при 900°C.

(*C-U*) и вольт-сименсные (*G-U*) характеристики в автоматическом режиме.

### 3. Экспериментальные данные и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты XDA анализа пленки оксида галлия, полученной ВЧ-магнетронным напылением на подложке GaAs после отжига в аргоне в течение 30 мин при 900°C.

В пленке Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> присутствуют кристаллиты β-фазы, ориентированные в направлениях [102], [401] и [023].

*C-U*- и *G-U*-зависимости образцов (рис. 2, *a*) описываются кривыми, характерными для структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структура). Толщина оксидной пленки, рассчитанная по формуле плоского конденсатора из значения емкости диэлектрика в режиме обогащения (*C<sub>d</sub>* = 740 пФ), составляет 124 нм.

Расчет концентрации носителей заряда в полупроводнике при использовании вольт-фарадной характеристики в режиме обеднения (рис. 3) показал, что *N<sub>d</sub>* = 1.5 · 10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>, что с учетом погрешности эксперимента удовлетворительно соответствует исходной концентрации электронов в эпитаксиальной пленке.

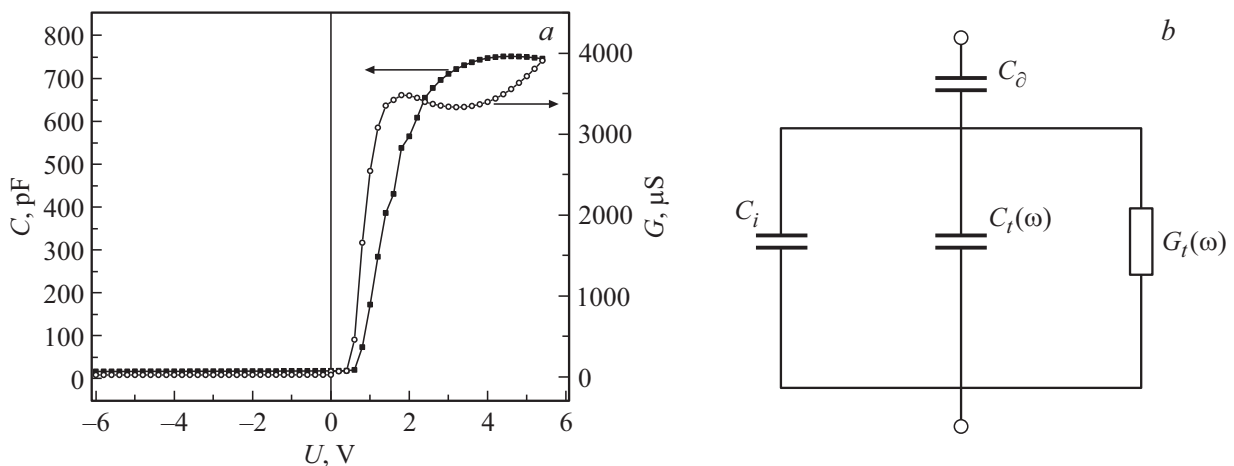
Таким образом, нанесение ВЧ магнетронным напылением пленки оксида галлия не изменяет исходную концентрацию электронов в GaAs в отличие от получения пленки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом электрохимического анодирования [10].

При включении УФ излучения наблюдается лишь небольшой рост проводимости *G* в режиме обеднения (рис. 4), емкостные свойства структуры практически не изменяются.

Темновые вольт-амперные характеристики образцов (*I<sub>D</sub>*) — нелинейные, определяются знаком и величиной потенциала на затворе (рис. 5). Коэффициент выпрямления при напряжениях ±4 В составляет 10<sup>3</sup>.

При воздействии ультрафиолетового излучения (УФИ) прямой ток снижается, а обратный — увеличивается. Наиболее заметное влияние излучения с λ = 254 нм наблюдается при низких положительных и отрицательных напряжениях на образце, в окрестности *U* ≈ 0 В. Такие структуры обладают вольт-амперным эффектом, их принято характеризовать как self-powered photo diodes. Для большинства образцов, исследованных в данной работе, напряжение холостого хода *U<sub>xx</sub>* составляет (0.40–0.43) В, а ток короткого замыкания *I<sub>sc</sub>* — (4–10) · 10<sup>-7</sup> А.

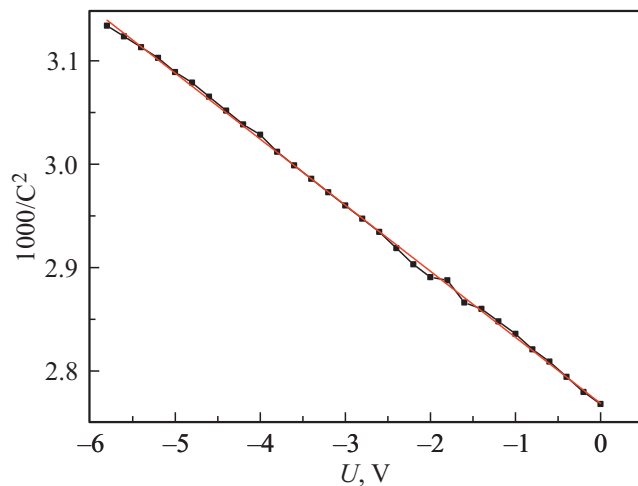
На рис. 6 в более подробном масштабе показано влияние УФ излучения на ВАХ образцов при непрерывном действии (кривые *I<sub>L1</sub>*–*I<sub>L5</sub>*). Наибольшие изменения прямых и обратных токов во время УФИ наблюдаются при первом опросе детектора (*I<sub>L1</sub>*) и снижаются при последующих измерениях ВАХ во время непрерывного действия УФ излучения (рис. 6, кривые *I<sub>L2</sub>*–*I<sub>L5</sub>*).



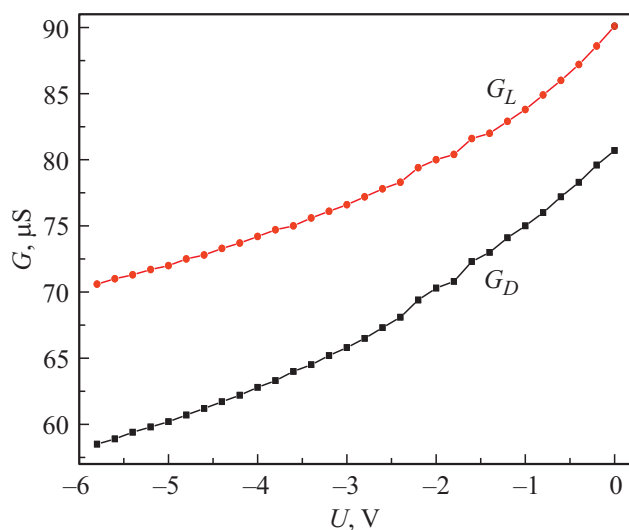
**Рис. 2.** Вольт-фарадная и вольт-сименсная характеристики структуры Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs (*a*); эквивалентная схема, используемая для расчета плотности состояний на границе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs (*b*).

Подобно многим детекторам УФИ на основе пленок оксида галлия структуры  $M/Ga_2O_3/n-GaAs$ , исследованные в данной работе, обнаруживают остаточные токи, обозначенные на рис. 6 как кривые  $I_{D1}$ .

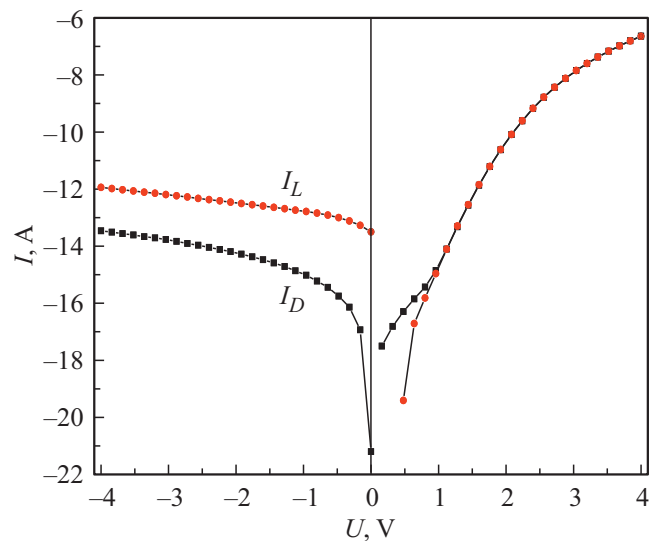
Исследованные структуры  $M/Ga_2O_3/n-GaAs$  обнаруживают свойства фотодиодов, работающих в вольтаическом режиме. При воздействии излучения с  $\lambda = 254$  нм и напряжении  $U = -0.012$  В обратный ток увеличивается более чем на 2 порядка, что позволяет использовать такие структуры в качестве детекторов УФ излучения в диапазоне длин волн 200–280 нм. При напряжениях, близких к нулевым значениям, практически не наблюдается влияние остаточной проводимости (persistent conductivity) на временные характеристики детекторов. На рис. 7 показано изменение во времени проводимости диода при включении и выключении УФИ при напряжении 0.005 В.



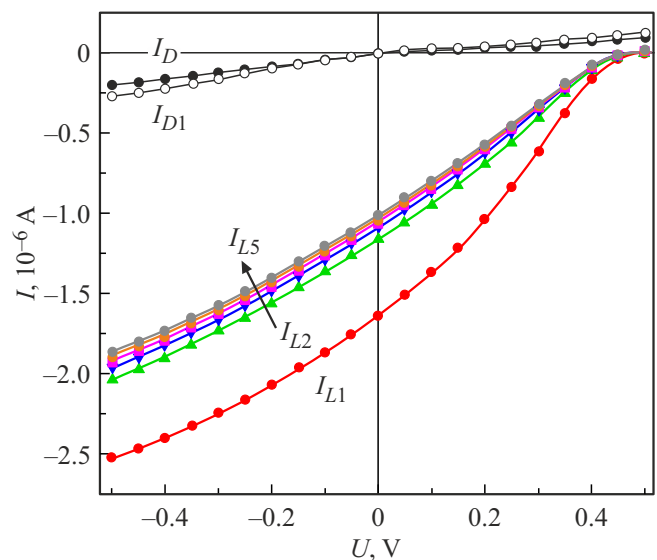
**Рис. 3.** Зависимость квадрата обратной емкости от напряжения.



**Рис. 4.** Вольт-сименсные характеристики структуры  $M/Ga_2O_3/n-GaAs$  в режиме обеднения: темновая ( $G_D$ ) и при воздействии излучения с  $\lambda = 254$  нм ( $G_L$ ).



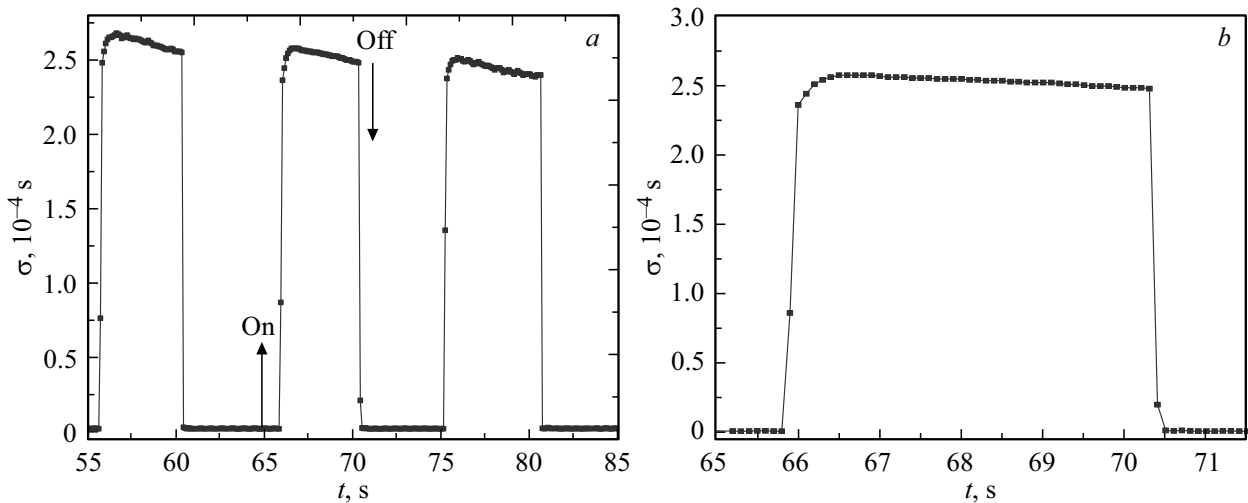
**Рис. 5.** Вольт-амперные характеристики образца при положительных и отрицательных потенциалах на затворе: темновые ( $I_D$ ) и при воздействии излучения с  $\lambda = 254$  нм ( $I_L$ ).



**Рис. 6.** Вольт-амперные характеристики образца при положительных и отрицательных потенциалах на затворе: темновые ( $I_D$ ) и при воздействии излучения с  $\lambda = 254$  нм ( $I_{L1}-I_{L5}$ ).

Время отклика  $\tau_r$  и время восстановления  $\tau_f$ , определенные по уровню 0.9 и 0.1 соответственно, не превышают 1–2 с; время восстановления  $\tau_f$  по уровню 0.1 составляет — (1–2) с (рис. 7, б), что меньше временных параметров УФ детекторов на основе барьерных структур со встречно-штырьевыми электродами [11].

Снижение фототока при многократном опросе структур во время непрерывного действия УФ излучения (рис. 6) объясняется участием ловушечных центров в формировании отклика. Фототок формируется не только переходом электронов из валентной зоны в зону прово-



**Рис. 7.** Временные зависимости изменения проводимости M/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs структуры при включении и выключении излучения с  $\lambda = 254$  нм (a); отдельный импульс в более подробном временном масштабе (b).  $U = 0.005$  В.

димости, но и забросом носителей заряда из ловушечных центров. Ловушки локализованы в запрещенной зоне оксидной пленки [12–14] и на границе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs. В силу больших различий параметров моноклинной решетки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и решетки сфалерита GaAs, предполагается наличие большой плотности поверхностных состояний на интерфейсе. По мере опустошения ловушек их вклад в отклик снижается, и величина фототока стабилизируется (рис. 6, кривые  $I_{L2} - I_{L5}$ ).

Плотность ловушечных центров  $N_t$  на границе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs оценивали, используя вольт-фарадные и вольт-сименские характеристики МДП-структур, измеренные мостовым методом при параллельном включении емкости ( $C$ ) и проводимости ( $G$ ). Для этого полученные значения  $C$  и  $G$  необходимо пересчитать с помощью формул (1)–(3) в соответствии с эквивалентной схемой, показанной на рис. 2, b, и получить зависимости  $C_{sc}(\omega)$  и  $G_t(\omega)/\omega$  [15]:

$$C_{sc}(\omega) = \frac{\omega^2 C_\delta^2 C - C_\delta(G^2 + \omega^2 C^2)}{G^2 + \omega^2(C_\delta - C)^2}, \quad (1)$$

$$\frac{G_t(\omega)}{\omega} = \frac{\omega C_\delta^2 G}{G^2 + \omega^2(C_\delta - C)^2}, \quad (2)$$

$$C_{sc}(\omega) = C_i + C_t(\omega). \quad (3)$$

В формулах (1)–(3)  $C_{sc}$  — емкость области пространственного заряда;  $C_\delta$  — емкость диэлектрика;  $C_i$  и  $G_t$  — соответственно дифференциальная емкость и проводимость, обусловленные перезарядкой поверхностных состояний, энергетические уровни которых совпадают с уровнем Ферми на поверхности полупроводника  $F_s$ ;  $C_i$  — емкость инверсионного слоя. Для расчета емкости

инверсионного слоя можно использовать формулу [15]

$$C_i = S \left( \frac{\epsilon \epsilon_0 e N_d}{2|\varphi_s|} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $S$  — площадь электрода к диэлектрику,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\varphi_s$  — поверхностный потенциал. Экспериментально емкость  $C_i$  находят, определив минимальное значение измеренной емкости ( $C_{min}$ ) на ВФХ при больших отрицательных смещениях на МДП-структуре

$$\frac{1}{C_{min}} = \frac{1}{C_\delta} + \frac{1}{C_i}. \quad (5)$$

Зависимость  $G_t(\omega)/\omega$  от напряжения описывается кривой с максимумом при том же напряжении, что и кривая  $G(U)$  на рис. 2, a. Используя полученные в соответствии с выражением (2) данные и формулу (6) [15]

$$\left( \frac{G_t}{\omega} \right)_{max} \approx 0.4 e^2 N_t(F_s), \quad (6)$$

получили энергетическую плотность ловушек  $N_t = 0.32 \cdot 10^{13} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Найденное значение  $N_t$  характеризует плотность состояний только на границе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs и, как отмечалось выше, обусловлено несоответствием параметров кристаллических решеток оксида галлия и арсенида галлия. Изменение фототока структур Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs во время непрерывного действия излучения с  $\lambda = 254$  нм определяется ловушками не только на интерфейсе, но и в объеме оксидной пленки.

#### 4. Заключение

Исследованы электрические и фотоэлектрические характеристики структур Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs, полученных ВЧ

магнетронным напылением пленки оксида галлия на эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs с концентрацией  $N_d = 9.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Толщина оксидной пленки равнялась 120 нм. Вольт-фарадные и вольт-сименсные зависимости образцов описываются кривыми, характерными для структур металл–диэлектрик–полупроводник. При измерении на частоте  $10^6$  Гц структуры  $\text{Ga}_2\text{O}_3/n$ -GaAs обнаруживают слабую чувствительность к излучению с  $\lambda = 254$  нм. При работе на постоянном сигнале образцы проявляют свойства фотодиода и способны работать в автономном режиме. Фотоэлектрические характеристики детекторов во время непрерывного действия излучения с  $\lambda = 254$  нм определяются высокой плотностью ловушек на границе  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$  и в объеме оксидной пленки.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] J. Bae, Ji-H.Park, D.-W.Jeon, J. Kim. *APL Mater.*, **9**, 101108 (2021).
- [2] A. Atilgan, A. Yildiz, U. Harmanci, M.T. Gulluoglu, K. Salimi. *Mater. Today Commun.*, **24**, 101105 (2020).
- [3] Y. Cui, S. Zhang, Q. Shi, S. Hao, A. Bian, X. Xie, Z. Liu. *Phys. Scr.*, **96**, 125844 (2021).
- [4] S. Li, Z. Yan, Z. Liu, J. Chen, Y. Zhi, D. Guo, P. Li, Z. Wu, W. Tang. *J. Mater. Chem. C*, **8**, 1292 (2020).
- [5] Z. Yan, S. Li, J. Yue, X. Ji, Z. Liu, Y. Yang, P. Li, Z. Wu, Y. Guo, W. Tang. *J. Mater. Chem. C*, **9**, 14788 (2021).
- [6] Z. Yan, S. Li, J. Yue, X. Ji, Z. Liu, Y. Yang, P. Li, Z. Wu, Y. Guo, W. Tang. *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, **13**, 57619 (2021).
- [7] D. You, C. Xu, J. Zhao, W. Zhang, F. Qin, J. Chen, Z. Shi. *J. Mater. Chem. C*, **7**, 3056 (2019).
- [8] H. Lin, A. Jiang, S. Xing, L. Li, W. Cheng, J. Li, W. Miao, X. Zhou, L. Tian. *Nanomaterials*, **12**, 910 (2022).
- [9] B.R. Tak, M.M. Yang, Y.H. Lai, Y.H. Chu, M.A.R. Singh. *Scientific Rep.*, 10:16098 (2020).
- [10] В.М. Калыгина, В.В. Вишникина, А.Н. Зарубин, Ю.С. Петрова, М.С. Скакунов, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев, Т.М. Яскевич. *Изв. вузов. Физика*, **9**, 11 (2013).
- [11] V.M. Kalygina, A.V. Tsybalov, A.V. Almaeva, Yu.S. Petrova. *Semiconductors*, **55**, 341 (2021).
- [12] B.R. Tak, M. Yang, M. Alexe, R. Singh. *Crystals*, **11**, 1046 (2021).
- [13] Y.K. Frodason, K.M. Johansen, L. Vines, J.B. Varley. *Appl. Phys.*, **127**, 075701 (2020). doi: 10.1063/1.5140742
- [14] Y.J. Zhang, J. Shi, D.-C. Qi, L. Chen, H.L. Zhang. *APL Mater.*, **8**, 020906 (2020).
- [15] В.И. Гаман, Н.Н. Иванова, В.М. Калыгина, Е.Б. Судакова. *Изв. вузов. Физика*, № **11**, 99 (1992).

Редактор Г.А. Оганесян

## Self-powered photo diodes based on $\text{Ga}_2\text{O}_3/n$ -GaAs structures

V.M. Kalygina, O.S. Kiselyeva, B.O. Kushnarev, V.L. Oleynik, Yu.S. Petrova, A.V. Tsybalov

National Research Tomsk State University, 634050 Tomsk, Russia

**Abstract** The electrical and photoelectric characteristics of the  $\text{Ga}_2\text{O}_3/n$ -GaAs structures have been studied. A gallium oxide film was obtained by HF magnetron sputtering on  $n$ -GaAs epitaxial layers with concentration of  $N_d = 9.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  concentration. The thickness of the oxide film was 120 nm. Measurements at a frequency of  $10^6$  Hz have shown that the capacitance-voltage and conductance-voltage dependences are described by curves characteristic of metal–insulator–semiconductor structures and exhibit low sensitivity to radiation with  $\lambda = 254$  nm. When operating on a constant signal, the samples exhibit the properties of a photodiode and are able to work offline. The photoelectric characteristics of the detectors during continuous exposure to radiation with  $\lambda = 254$  nm are determined by the high density of traps at the  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$  interface and in the oxide film.