

УФ-фотодиоды на основе Pt/ β -Ga₂O₃ с субмикросекундным быстродействием

© А.В. Цымбалов¹, Н.Н. Яковлев¹, Д.А. Алмаев¹, В.В. Копьев¹, Б.О. Кушнарев¹, П.В. Космачев¹

¹ Центр исследований и разработок „Перспективные технологии в микроэлектронике“
Национального исследовательского Томского государственного университета,
634050 Томск, Россия

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия

E-mail: Zoldmine@gmail.com

Поступила в Редакцию 1 июня 2026 г.

В окончательной редакции 29 июня 2026 г.

Принята к публикации 3 июля 2026 г.

Представлены результаты разработки и исследования быстродействующих ультрафиолетовых фотодиодов Шоттки на основе Pt/ β -Ga₂O₃. Подложки β -Ga₂O₃ с ориентацией (100) обладают высоким оптическим пропусканием ($T \geq 80\%$) в видимом диапазоне длин волн ($\lambda \geq 380$ нм). Детекторы демонстрируют высокую чувствительность к УФ-излучению, а также обладают внутренним усилением фототока. При длине волны 254 нм и обратном напряжении -20 В токовая монохроматическая чувствительность, квантовая эффективность и удельная обнаружительная способность составляют 1 А/Вт, 488 % и $1.3 \cdot 10^{12}$ см²·Гц^{0.5}·Вт⁻¹ соответственно. Исследование переходных характеристик показало, что полученные структуры характеризуются малыми временами отклика и восстановления, составляющими 4.4 и 1.4 мкс соответственно при нулевом смещении.

Ключевые слова: оксид галлия, УФ-детектор, быстродействие, усиление.

DOI: 10.61011/FTR.2026.03.63589.9973

1. Введение

Оксид галлия (Ga₂O₃) является перспективным широкозонным полупроводниковым материалом для создания солнечно-слепых УФ-фотодетекторов [1,2]. Интерес к данному материалу обусловлен сочетанием его физико-химических свойств, включая широкую запрещенную зону ($E_g \sim 4.7$ эВ), высокую химическую и термическую стабильности, а также прозрачность в видимом диапазоне спектра [3,4]. По сравнению с другими широкозонными материалами, такими как AlGa₂N, SiC и ZnO, оксид галлия доступен для роста большинством существующих способов, включая методы: Чохральского, Бриджмана, зонной плавки и т.д. [5]. Это обеспечивает возможность получать монокристаллические подложки диаметром 4–6 дюймов, что обеспечивает относительно низкую себестоимость производства [6].

Детекторы на основе Ga₂O₃ характеризуются высокой чувствительностью к УФ-излучению [7]. Однако зачастую это сопровождается низким быстродействием устройств: времена отклика и восстановления могут достигать нескольких секунд [8]. Ранее для фоторезистивных структур на основе оксида галлия было показано, что величина приложенного напряжения оказывает существенное влияние не только на чувствительность к излучению, но и на временные характеристики устройств [9]. В то же время количество работ, посвященных исследованию динамических характеристик фотодиодов Шоттки на основе Ga₂O₃, остается ограниченным, а в ряде случаев отсутствует анализ полной релаксации фотото-

ка, что затрудняет корректную оценку быстродействия устройств [10].

В данной работе представлены результаты исследования вертикальных УФ-фотодиодов Шоттки на основе структур Pt/ β -Ga₂O₃. Основное внимание уделено анализу быстродействия и механизмов внутреннего усиления фототока. Показано, что минимальные времена отклика достигаются при нулевом смещении за счет встроенного электрического поля в области пространственного заряда.

2. Методика

Для изготовления вертикальных диодов Шоттки (ДБШ) использовались коммерческие подложки β -Ga₂O₃ (Garen Semiconductor, Китай) с непреднамеренным легированием ($N_d \approx 10^{17}$ см⁻³), ориентацией (100) и толщиной 650 мкм. Перед формированием омического контакта поверхность подложек подвергалась травлению в 30-процентном растворе соляной кислоты с последующей промывкой в деионизованной воде. Непосредственно перед металлизацией проводилась очистка поверхности в кислородной плазме. Омический контакт формировали методом электронно-лучевого испарения слоя Ti толщиной 60 нм с последующим нанесением защитного слоя Ni толщиной 40 нм. После металлизации выполнялся отжиг в атмосфере азота при температуре 300 °С в течение 30 мин. Контакты Шоттки формировались методом фотолитографии с последующим нанесением слоя Pt толщиной 100 нм. Диаметр контакта Шоттки

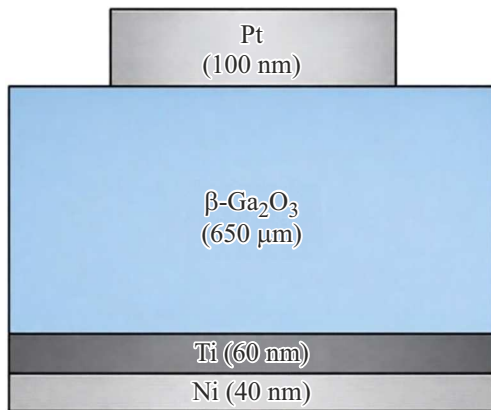


Рис. 1. Схематическое изображение диода Шоттки на основе Pt/ β -Ga₂O₃/Ti/Ni.

составлял 0.5 мм. На заключительном этапе подложка разделялась на отдельные чипы размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$ с использованием дисковой дробилки. Схематическое изображение структуры устройства представлено на рис. 1.

Спектры оптического пропускания регистрировались с использованием дейтериевой лампы D-2000 (Micropack) в диапазоне длин волн 250–400 нм. Прошедшее излучение анализировалось спектрометром Ocean Optics Flame с рабочим диапазоном 200–850 нм и спектральным разрешением 1 нм.

Измерения быстродействия проводились с помощью цифрового осциллографа LeCroy 104XS с полосой пропускания 1 ГГц и УФ-светодиода с максимальной интенсивностью излучения при $\lambda = 255 \text{ нм}$. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) измерялись с помощью источника-измерителя Keithley 2636A и RLC-метра Agilent E4980A соответственно. Измерения ВФХ проводились при частоте 1 кГц с переменным сигналом 100 мВ.

Электрические и фотоэлектрические характеристики структур исследовались при комнатной температуре и влажности окружающей среды. В качестве источника УФ-излучения использовалась лампа VL-6.C с длиной волны $\lambda = 254 \text{ нм}$ и плотностью мощности излучения 620 мВт/см^2 . Измерения электропроводящих характеристик ДБШ проводились в камере Nextron MPS-CHN, оснащенной микрондами.

Зависимости токовой монохроматической чувствительности R_λ , квантовой эффективности η и удельной обнаружительной способности от длины волны и приложенного напряжения рассчитывались по следующим выражениям [11]:

$$R_\lambda = \frac{I_{\text{ph}}}{A \times P}, \quad (1)$$

$$\eta = R_\lambda \frac{hc}{e\lambda}, \quad (2)$$

$$D^* = R_\lambda \sqrt{\frac{A}{2eI_D}}, \quad (3)$$

где I_{ph} — величина фототока, A — площадь облучаемой поверхности фотоприемника, P — удельная мощность падающего излучения, λ — длина волны излучения, I_D — величина темнового тока, e — заряд электрона, h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме.

3. Результаты и обсуждения

На рис. 2 представлена рентгеновская дифрактограмма подложки Ga₂O₃, содержащая набор интенсивных дифракционных пиков. Наблюдаемые рефлексы соответствуют отражениям от плоскостей (400), (600) и (800), относящихся к семейству (100), характерному для моноклинной фазы β -Ga₂O₃. Полученные результаты подтверждают монокристаллическую структуру подложки β -Ga₂O₃ и ее ориентацию параллельно кристаллографической плоскости (100).

Подложки оксида галлия характеризуются высокой прозрачностью в видимом диапазоне спектра. Как видно из рис. 3, коэффициент пропускания T достигает 80 % при $\lambda \geq 380 \text{ нм}$. В диапазоне 290–400 нм наблюдается монотонное уменьшение T , соответствующее хвосту Урбаха, обусловленному поглощением на дефектных состояниях. Дальнейшее резкое снижение коэффициента пропускания при $\lambda < 280 \text{ нм}$ связано с межзонным поглощением. Для определения оптической ширины запрещенной зоны β -Ga₂O₃ была построена зависимость линейного коэффициента поглощения α^2 от энергии фотона. Полученное значение оптической ширины запрещенной зоны составило $E_g = 4.67 \pm 0.05 \text{ эВ}$. Линейный характер зависимости в соответствующих координатах (α^2 от энергии падающего фотона) указывает на прямозонный характер межзонных переходов в исследуемом материале [12].

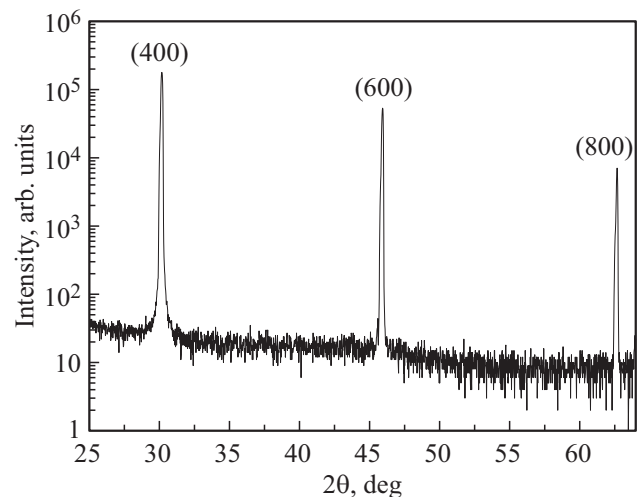


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма подложки β -Ga₂O₃.

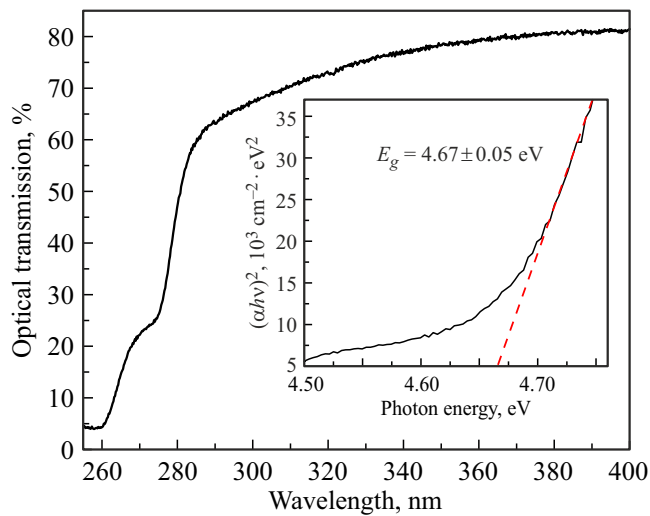


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента пропускания β -Ga₂O₃. На вставке — зависимость α^2 от энергии фотона (красная прямая — линейная аппроксимация).

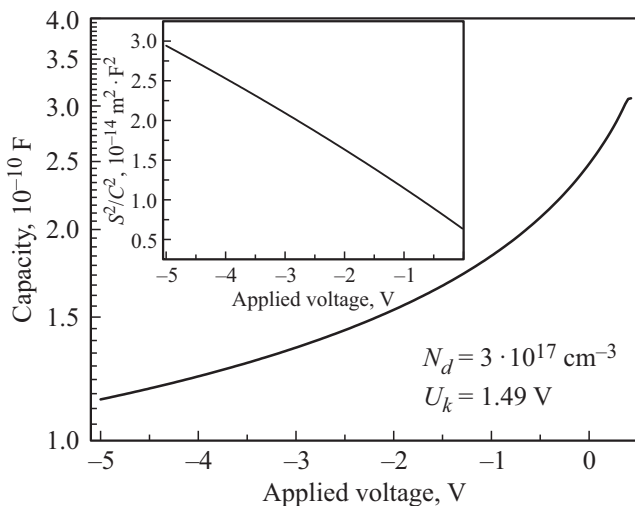


Рис. 4. Вольт-фарадная характеристика диода на основе Pt/ β -Ga₂O₃. На вставке — зависимость C^{-2} от U .

На рис. 4 представлены вольт-фарадные характеристики полученных структур Pt/ β -Ga₂O₃ в диапазоне напряжений от 0.5 до -5 В. На основе полученных данных была построена зависимость C^{-2} от U , откуда была определена концентрация примеси $N_d = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а также контактная разность потенциалов $U_k = 1.47$ В.

Для полученных диодов Шоттки были измерены вольт-амперные характеристики в диапазоне напряжений от -20 до 2 В (рис. 5, а). В режиме обратного смещения темновой ток увеличивается с 3.3 пА до 18.6 нА при повышении напряжения от 0 до -20 В, тогда как в прямой ветви ВАХ ток достигает 23.2 мкА при напряжении 2 В. Высота потенциального барьера Шоттки составила $\Phi_b = 1.67$ эВ, а коэффициент выпрямления $8.3 \cdot 10^5$ — произвольная единица при $U = \pm 2$ В.

Зависимость времен отклика и восстановления диодов Шоттки на основе Pt/ β -Ga₂O₃ от приложенного обратного смещения

Напряжение, В	t_r , мс	t_f , мс
0	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$
0.5	1.9	1.9
1	1.9	1.9
5	6.1	3.7
10	5.4	13.7

Воздействие УФ-излучения с длиной волны $\lambda = 254$ нм сопровождается существенным увеличением обратного тока на $3\text{--}4$ порядка величины. Значение фототока возрастает от 21.2 нА при нулевом смещении до 6.2 мкА при напряжении -20 В. Исследуемые структуры демонстрируют выраженный фотодиодный отклик и способны функционировать в фотовольтаическом режиме. При этом ток короткого замыкания составляет 8.2 нА, а напряжение холостого хода — 0.3 В.

На рис. 5, б представлена зависимость токовой монохроматической чувствительности R_λ от приложенного смещения. Увеличение обратного напряжения с 0 до -20 В приводит к монотонному росту R_λ от 3 мА/Вт до 1 А/Вт, в то время как при прямом смещении R_λ достигает 4.45 А/Вт уже при 2 В. Следует отметить, что максимальное теоретическое значение R_λ для β -Ga₂O₃ составляет ~ 0.21 А/Вт, что говорит о наличии внутреннего усиления [13]. Кроме того, это отражает значения квантовой эффективности, которые достигают 488 и 2175% при напряжениях -20 В и 2 В соответственно (рис. 5, в). Удельная обнаружительная способность возрастает при увеличении обратного смещения и достигает $D^* = 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0.5} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при $U = -20$ В.

Быстродействие полученных структур исследовалось при периодическом импульсном воздействии УФ-излучения с длиной волны 255 нм (рис. 6). Установлено, что максимальное быстродействие достигается при отсутствии внешнего смещения. На рис. 6, а представлена осциллограмма отклика ДБШ при нулевом смещении. Время отклика (t_r , $10\text{--}90\%$) составило 4.4 мкс, тогда как время восстановления (t_f , $90\text{--}10\%$) — 1.4 мкс. Должно быть отмечено, что данные времена были получены при полной релаксации фототока структуры, а не при единичном импульсе [14]. При приложении обратного смещения наблюдается существенное ухудшение быстродействия фотодиода. В частности, при напряжении -10 В время отклика составляет до 5.4 мс, а время восстановления — до 13.7 мс (рис. 6, б). Зависимости времен отклика и спада от величины приложенного обратного напряжения приведены в таблице.

Фотоусиление в диодах Шоттки на основе Pt/ β -Ga₂O₃ обусловлено вкладом фоторезистивного механизма усиления. При нулевом смещении квантовая эффективность составляет 1.7% , тогда как при обратном смещении

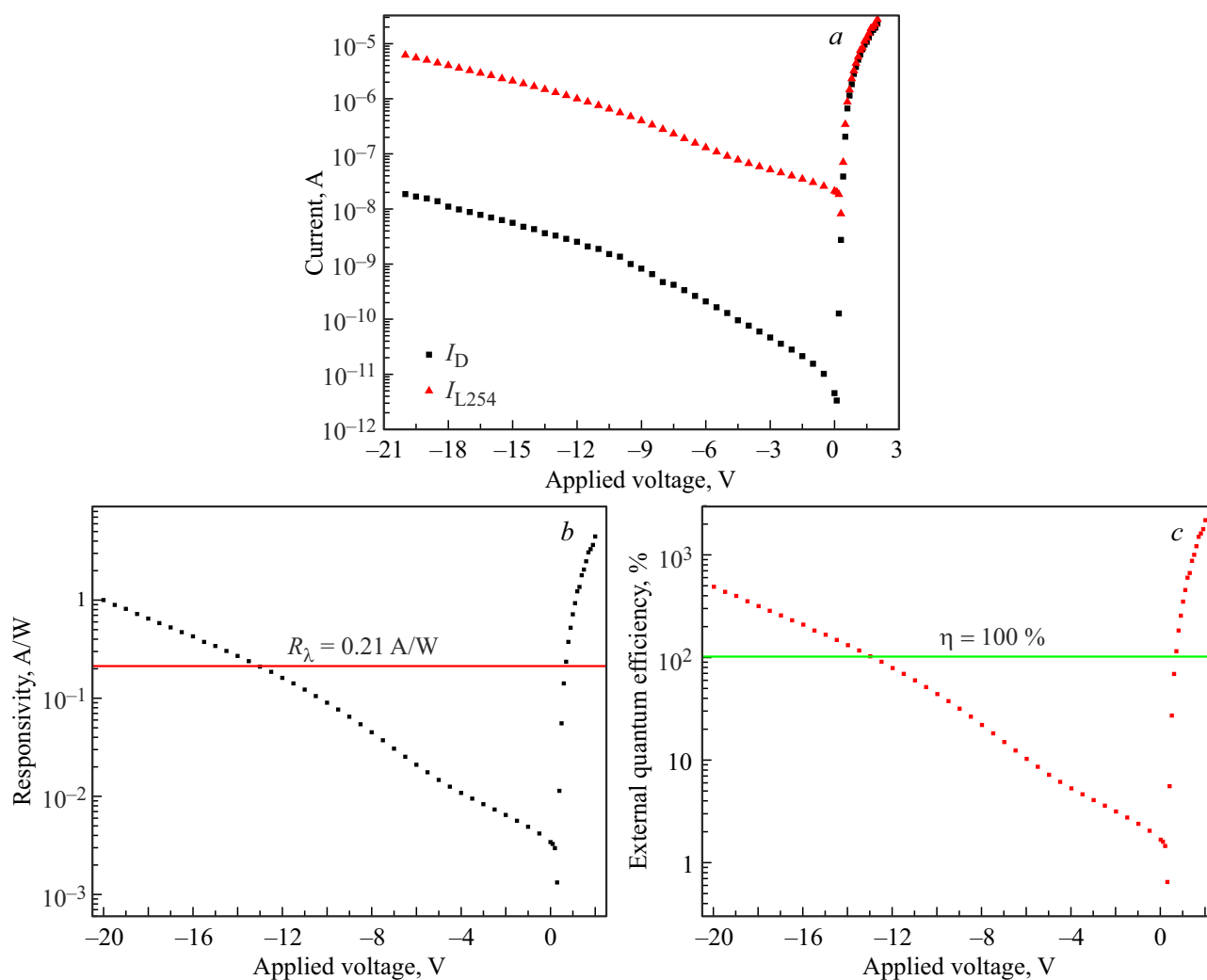


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики, полученные в темновых условиях (черная кривая) и при воздействии УФ-излучения (красная кривая) с длиной волны $\lambda = 254$ нм (a); зависимости токовой монохроматической чувствительности (b) и квантовой эффективности (c) от приложенного напряжения.

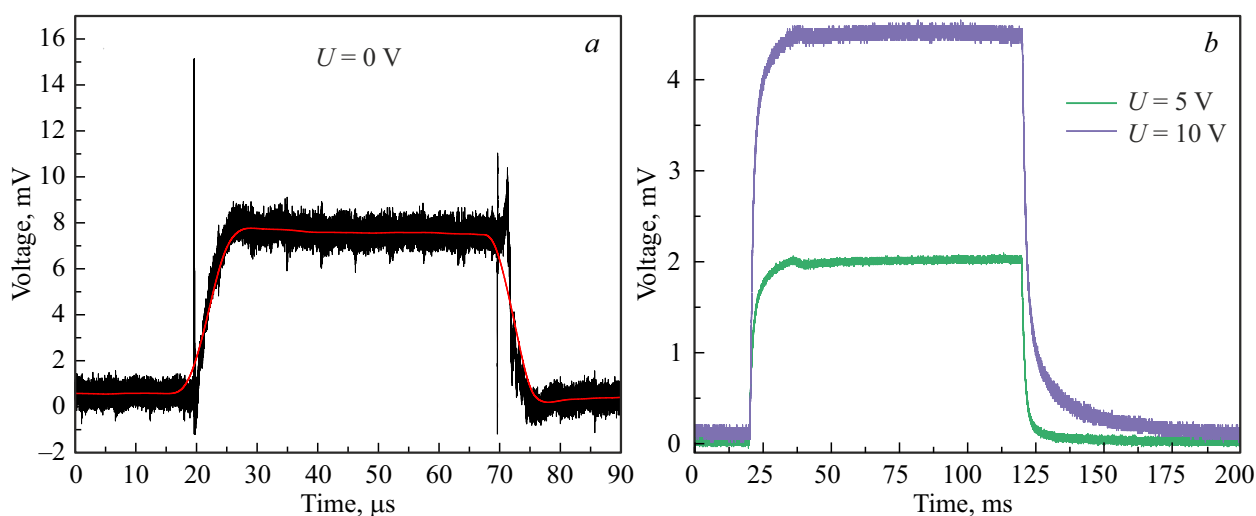


Рис. 6. Осциллограммы диодов Шоттки на основе $Pt/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ при импульсном воздействии УФ-светодиода с $\lambda = 255$ нм: a — при нулевом смещении (красная кривая — сглаживание сигнала), b — при обратном смещении 5 и 10 В.

–13 В достигает уже 100 %. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к превышению значения $\eta > 100 \%$, что свидетельствует о наличии внутреннего усиления фототока. Наблюдаемый эффект связан с тем, что приложенное напряжение распределяется не только в области пространственного заряда (ОПЗ) барьера Шоттки, но и в объеме подложки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. В результате фототок формируется как за счет фотодиодного механизма генерации и разделения носителей заряда в ОПЗ, так и вследствие фоторезистивного эффекта, обусловленного изменением проводимости объема полупроводника под воздействием УФ-излучения. Дополнительным подтверждением данного механизма является существенное увеличение квантовой эффективности при прямом смещении $U = 2$ В. В таком режиме электрическое поле практически равномерно распределено по подложке $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, и структура работает как фоторезистор, а квантовая эффективность достигает 2175 %.

Согласно классическим представлениям, увеличение обратного смещения должно приводить к повышению быстродействия диодов Шоттки вследствие уменьшения барьерной емкости и возрастания напряженности электрического поля. Однако в исследуемых структурах минимальные времена отклика и восстановления наблюдаются при нулевом смещении, тогда как увеличение обратного напряжения до –10 В сопровождается ухудшением быстродействия более чем на 3 порядка. Вероятной причиной данного эффекта является не только падение напряжения на объеме оксида галлия, но и увеличение вклада ловушечных состояний при расширении области пространственного заряда. Рост ширины ОПЗ приводит к вовлечению дополнительного числа дефектных состояний в процессы захвата и высвобождения неравновесных носителей заряда.

4. Заключение

В настоящей работе были разработаны и исследованы вертикальные УФ-фотодиоды с барьером Шоттки на основе $\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. По результатам оптических измерений установлено, что подложки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ обладают высокой прозрачностью $T \geq 80 \%$ в видимом диапазоне, а значение оптической ширины запрещенной зоны составляет $E_g = 4.67 \pm 0.05$ эВ. Исследование электрических характеристик показало формирование выпрямляющего контакта с высотой барьера Шоттки $\Phi_b = 1.67$ эВ и коэффициентом выпрямления $8.3 \cdot 10^5$ — произвольная единица $U = \pm 2$ В.

Максимальное значение токовой монохроматической чувствительности составило 1 А/Вт при обратном смещении –20 В, а квантовая эффективность достигала 488 %, что указывает на наличие внутреннего усиления фототока. Анализ фотоэлектрических характеристик показал, что механизм усиления обусловлен вкладом фоторезистивного эффекта, возникающего вследствие распределения приложенного напряжения в объеме под-

ложки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Минимальные времена отклика и восстановления наблюдаются при нулевом смещении и составляют 4.4 и 1.4 мкс соответственно. Увеличение обратного напряжения приводит к существенному ухудшению быстродействия, что связано с ростом вклада ловушечных состояний в процессы захвата и высвобождения неравновесных носителей заряда.

Финансирование работы

Результаты работы были получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки России, проект № FSWM-2025-0021.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Chen, S. Han, D. Yue, M. Fang, Y.X. Zeng, W. Liu, D. Zhu. ACS Photonics, **11** (3), 985 (2024). DOI: 10.1021/acsphotonics.3c01311
- [2] R. Raphael, S. Devasia, S. Shaji, E.I. Anila. Optical Mater., **133**, 112915 (2022). DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112915
- [3] Y. Pan, J. Zhu. Mater. Sci. Semicond. Process., **198**, 109747 (2025). DOI: 10.1016/j.mssp.2024.109747
- [4] F. Guemann, P. Nádaždy, K. Hušková, E. Dobročka, J. Priessol, F. Egyenes, M. Tápajna. Mater. Sci. Semicond. Process., **156**, 107289 (2023). DOI: 10.1016/j.mssp.2022.107289
- [5] M. Higashiwaki. AAPPS Bull., **32** (1), 3 (2022). DOI: 10.1007/s43673-022-00045-2
- [6] K. Sasaki. Appl. Phys. Express, **17** (9), 090101 (2024). DOI: 10.35848/1882-0786/ad6f0f
- [7] G. Shen, Z. Liu, C.K. Tan, M. Jiang, S. Li, Y. Guo, W. Tang. Appl. Phys. Lett., **123** (4), 042101 (2023). DOI: 10.1063/5.0158123
- [8] A.Y. Polyakov, E.B. Yakimov, I.V. Shchemerov, A.A. Vasilev, A.I. Kochkova, V.I. Nikolaev, S.J. Pearton. J. Phys. D: Appl. Phys., **58** (6), 063002 (2025). DOI: 10.1088/1361-6463/ad9f12
- [9] V.V. Kopyev, A.V. Almaev, A.V. Tsymbalov, D.A. Almaev, N.N. Yakovlev, P.V. Kosmachev. IEEE Sens. J., **25** (22), 41251 (2025). DOI: 10.1109/JSEN.2025.3615232
- [10] H. Lee, K.M. Lee, Y.B. Kim, Y.J. Moon, S.B. Kim, D. Bae, S.W. Lee. J. Alloys Compd., **780**, 400 (2019). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.11.366
- [11] Y. Qin, L.H. Li, Z. Yu, F. Wu, D. Dong, W. Guo, S. Long. Adv. Sci., **8** (20), 2101106 (2021). DOI: 10.1002/advs.202101106
- [12] M.M. Islam, A. Hernandez, H. Appuhami, A. Banerjee, B.P. Uberuaga, F.A. Selim. Nanomaterials, **16** (2), 93 (2026). DOI: 10.3390/nano16020093
- [13] C. Borelli, A. Bosio, A. Parisini, M. Pavesi, S. Vantaggio, R. Fornari. Mater. Sci. Eng. B, **286**, 116056 (2022). DOI: 10.1016/j.mseb.2022.116056
- [14] Y. Han, Y. Wang, S. Fu, J. Ma, H. Xu, B. Li, Y. Liu. Small, **19** (16), 2206664 (2023). DOI: 10.1002/smll.202206664

Редактор Г.А. Оганесян

UV Photodiodes Based on Pt/ β -Ga₂O₃ with Sub-Microsecond Response Time

A.V. Tsymbalov¹, N.N. Yakovlev¹, D.A. Almaev^{1,2},
V.V. Kopyev¹, B.O. Kushnarev¹, P.V. Kosmachev¹

¹ Research and Development Center

„Advanced Technologies in Microelectronics“,
National Research Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

² Tomsk State University

of Control Systems and Radioelectronics,
634050 Tomsk, Russia

Abstract The results of the development and study of high-speed ultraviolet Schottky photodiodes based on Pt/ β -Ga₂O₃ are presented. β -Ga₂O₃ substrates with (100) orientation exhibit high optical transmittance ($T \geq 80\%$) in the visible spectral range ($\lambda \geq 380$ nm). The fabricated detectors demonstrate high sensitivity to ultraviolet radiation and exhibit internal photocurrent gain. At a wavelength of 254 nm and a reverse bias of -20 V, the responsivity, external quantum efficiency, and detectivity are 1 A/W, 488 %, and $1.3 \cdot 10^{12}$ cm · Hz^{0.5} · W⁻¹, respectively. Transient response measurements show that the fabricated devices are characterized by short rise and decay times of 4.4 and 1.4 μ s, respectively, at zero bias.