

07

Быстродействующие детекторы УФ-излучения на основе пленок Ga₂O₃

© Д.А. Алмаев,^{1,2} А.В. Цымбалов,¹ В.В. Копьев¹

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия
e-mail: almaev001@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2025 г.

В окончательной редакции 6 мая 2025 г.

Принято к публикации 30 июня 2025 г.

Исследовано влияние температуры отжига в атмосфере Ar и времени роста пленок оксида галлия на электрические и фотоэлектрические характеристики структур Pt/Ga₂O₃. Пленки оксида галлия были получены методом ВЧ-магнетронного распыления на сапфировых подложках с базовой ориентацией (0001). Пленки Ga₂O₃ характеризуются высокой прозрачностью в длинноволновом УФ (UVA) и видимом (VIS) диапазонах $T > 80\%$. Максимальная фоточувствительность характерна для отожженных структур при 900 °C с толщиной активной области $d = 190$ nm. Значения токовой монохроматической чувствительности и отношения сигнал/шум составили 134 mA/W и $5.2 \cdot 10^5$ а.е. соответственно при напряжении 100 V. Структуры характеризуются высоким быстродействием, наименьшие времена отклика и восстановления при напряжении 10 V составили 2.1 и 0.6 ms соответственно.

Ключевые слова: фотодетектор, оксид галлия, ВЧ-магнетронное распыление, УФ-излучение, быстродействие.

DOI: 10.61011/JTF.2025.11.61606.49-25

Введение

Оксид галлия (Ga₂O₃) относится к классу ультраширокозонных полупроводников *n*-типа проводимости с шириной запрещенной зоны в диапазоне $E_g = 4.4\text{--}5.3$ eV. Ga₂O₃ обладает уникальными физико-химическими свойствами, соответствующими требованиям современной микро- и оптоэлектроники [1,2]. Данный материал демонстрирует полиморфизм и может существовать в пяти кристаллических модификациях: α , β , γ , δ и $\epsilon(\kappa)$. Наиболее подробно изученной является β -фаза, характеризующаяся моноклинной кристаллической решеткой, высокой химической инертностью и термической стабильностью, что делает ее перспективной для применения в приборах, функционирующих в экстремальных условиях [3].

Благодаря своим уникальным свойствам Ga₂O₃ широко используется в различных технологических областях, включая силовую электронику, газовые сенсоры, прозрачные электроды и детекторы ультрафиолетового излучения [4]. Особый интерес представляет разработка УФ-фотодетекторов, основанных на Ga₂O₃, что обусловлено высокой шириной его запрещенной зоны, селективностью и эффектом внутреннего усиления [5]. Среди известных конструктивных решений наибольшее распространение получили планарные структуры металл-полупроводник-металл (MSM), которые характеризуются высокой чувствительностью и технологической простотой [6].

Электрические и фотоэлектрические характеристики таких детекторов во многом определяются методами роста и последующей обработки структур на основе Ga₂O₃ [7]. В настоящее время формирование пленок оксида галлия осуществляется различными технологическими методами, включая импульсное лазерное осаждение (PLD), молекулярно-лучевую эпитаксию (MBE), осаждение металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD), химическое газозофазное осаждение при пониженном давлении (LPCVD), хлоридную газозофазную эпитаксию (HVPE), атомно-слоевое осаждение (ALD) и ВЧ-магнетронное распыление (RFMS) [3,8]. Последний метод привлекает внимание благодаря высокой скорости роста пленок и экономичности производства, при этом сформированные структуры обладают высокой чувствительностью к УФ-излучению.

Оптические и фотоэлектрические характеристики структур напрямую зависят от технологии получения пленок оксида галлия, а также последующих операций. В связи с этим настоящая работа направлена на исследование влияния времени роста и температурных условий отжига пленок Ga₂O₃ на оптические, электрические и фотоэлектрические свойства структур Pt/Ga₂O₃.

1. Методика исследования

Пленки Ga₂O₃ были получены методом RFMS мишеней Ga₂O₃ (99.999 %) на гладкие сапфировые подложки

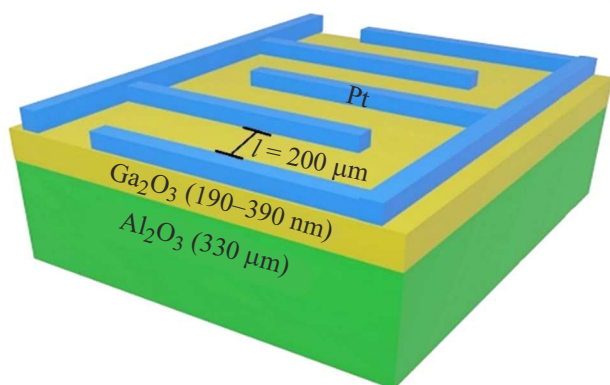


Рис. 1. Схематическое изображение структуры Pt/Ga₂O₃.

на установке AUTO-500 (Edwards) в газовой смеси Ar/O₂. Напыление пленок происходило в течение $t_g = 30$ и 60 min. Концентрация кислорода в смеси поддерживалась равной (56.1 ± 0.5) vol.%. Расстояние между мишенью и подложкой составляло 70 mm. Давление в камере во время напыления поддерживалось равным $7 \cdot 10^{-6}$ bar. Преднамеренного легирования пленок в процессе роста не проводилось. На следующем этапе подложка делилась на несколько частей, которые затем отжигались в потоке аргона при температуре $T_{an} = 700^\circ\text{C}$, 800°C и 900°C в течение 30 min. Далее на поверхности пленок Ga₂O₃ формировались Pt-контакты со встречно-штыревой топологией с межэлектродным расстоянием $l = 200 \mu\text{m}$. Сапфировые пластины с пленкой Ga₂O₃ и Pt-контактами были разрезаны на отдельные образцы размером 0.3×0.3 cm. В результате было получено шесть серий образцов с разным временем роста и температурой отжига. Схематическое изображение MSM-структур Pt/Ga₂O₃ представлено на рис. 1.

Для определения фазового состава пленок был использован метод рентгенодифракционного анализа (РДА). Измерения проводились с помощью дифрактометра X'PERT PRO производства PANalytical с излучением CuK α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) при напряжении 40 kV и силе тока 30 mA.

В качестве источника излучения для измерения спектров пропускания использовалась дейтериевая лампа D-2000 Microrack, обеспечивающая стабильное излучение в диапазоне $\lambda = 190 - 400$ nm. Прошедшее излучение попадало на вход спектрометра Ocean Optics Flame с рабочим диапазоном $\lambda = 200 - 850$ nm. Измерение λ проводилось с оптическим разрешением 1 nm. Управление измерениями осуществлялось с использованием программного обеспечения OceanView.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в темновых условиях и при освещении проводились при помощи микрозондовой установки фирмы Nextron и источника-измерителя Keithley 2636A. В качестве источника монохроматического ($\lambda = 254$ nm) излучения

была использована криптон-фторовая лампа с плотность потока излучения $P = 780 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Отношение фототока I_{ph} к темновому току I_D (PDCR), токовая монохроматическая чувствительность R_λ , удельная обнаружительная способность D^* и квантовая эффективность η были рассчитаны при помощи следующих выражений [5]:

$$\text{PDCR} = I_{ph}/I_D, \quad (1)$$

$$R_\lambda = I_{ph}/(P \cdot S_{\text{eff}}), \quad (2)$$

$$D^* = R_\lambda \cdot (S_{\text{eff}}/(2 \cdot e \cdot I_D))^{1/2}, \quad (3)$$

$$\eta = R_\lambda \cdot h \cdot c/(e \cdot \lambda), \quad (4)$$

где S_{eff} — эффективная площадь облучаемой поверхности фотоприемника; e — заряд электрона; h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме.

Импульсные характеристики детекторов измерялись с помощью цифрового осциллографа Tektronix 104XS с полосой пропускания 1 GHz и УФ-светодиода с максимумом интенсивности на $\lambda = 255$ nm.

Время нарастания фототока t_r определяется как время, в течение которого ток увеличивается от 10 % до 90 % максимального значения под воздействием облучения. Время спада фототока t_f определяется как время, в течение которого ток спадает от 90 % до 10 % максимального значения после воздействия излучения.

2. Результаты и обсуждение

На дифрактограммах пленок Ga₂O₃ (рис. 2) наблюдается множество пиков, отвечающих отражениям от плоскостей (-110) , (-311) , (-603) , (-221) и (603) , которые относятся к β -Ga₂O₃. Положение пиков и их интенсивность практически не зависят от температуры

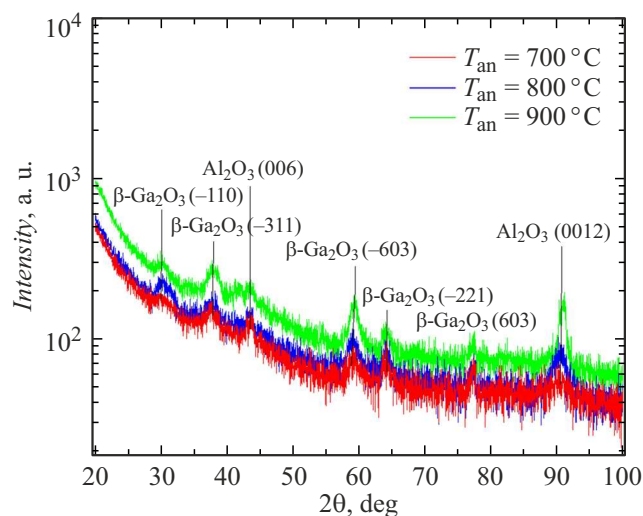


Рис. 2. Спектры РДА пленок Ga₂O₃ на сапфировых подложках, отожженных при разных температурах.

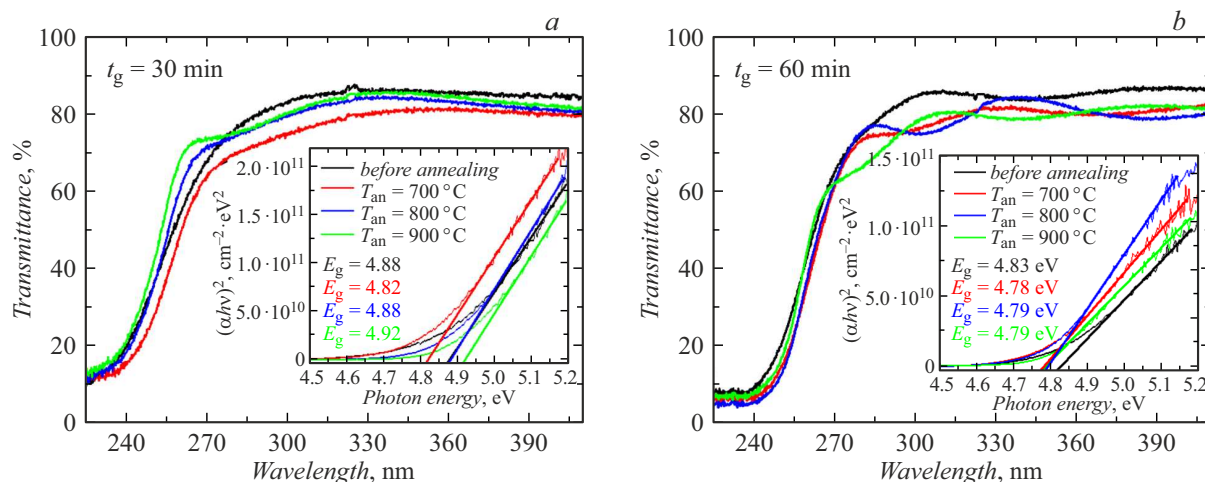


Рис. 3. Спектр оптического пропускания пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ для $t_g = 30$ и 60 min при разных T_{an} в аргоне. Вставка — зависимость $(\alpha h\nu)^2$ от энергии фотона.

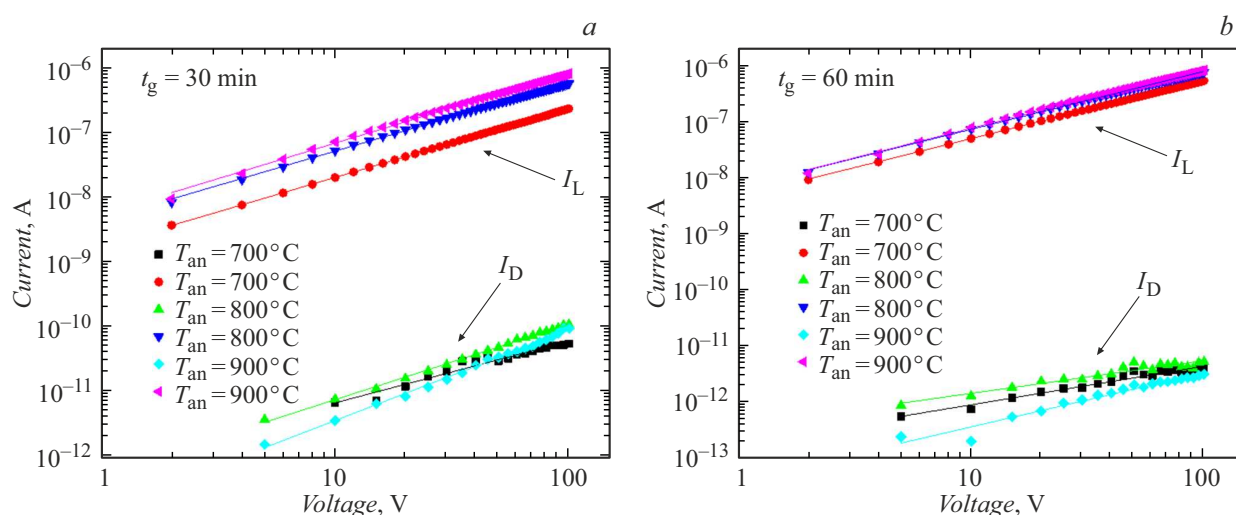


Рис. 4. ВАХ структур $\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в темновых условиях и при воздействии УФ-излучения.

отжига. На всех дифрактограммах присутствуют пики от сапфировой подложки, соответствующие семейству плоскостей (0001). РДА показал, что все пленки Ga_2O_3 являются поликристаллическими и соответствуют β -фазе.

На рис. 3 представлены спектры оптического пропускания пленок Ga_2O_3 до отжига и после отжига в атмосфере Ar для разных T_{an} . Для определения толщины пленок d использовалось выражение для коэффициента пропускания T , учитывающего многократное отражение внутри образца и интерференцию лучей, выходящих из образца [9]. Толщина пленок Ga_2O_3 составила 190 и 390 nm для $t_g = 30$ и 60 min соответственно. Значения T уменьшаются с увеличением t_g почти в два раза, что соответствует изменению d . Кроме того, выполняется соотношение $ad \approx 1$, где α — коэффициент поглощения, что указывает на отсутствие сильного поглощения.

Для определения значения оптической ширины запрещенной зоны E_g^{opt} была исследована зависимость α от

энергии фотона $h\nu$. Более точно данная зависимость аппроксимируется в координатах $(\alpha h\nu)^2$ от $h\nu$, что свидетельствует о прямых оптических переходах, а значения E_g^{opt} для пленок Ga_2O_3 составили 4.82 – 4.92 eV, что соответствует литературным данным [4]. Значения E_g^{opt} изменяются в пределах погрешности (± 0.05 eV).

На рис. 4 представлены ВАХ структур $\text{Pt}/\text{Ga}_2\text{O}_3$. Зависимость I_D от U является линейной ($I_D \propto U^m$, где $m \approx 1$ (табл. 1)) и симметричной относительно полярности приложенного напряжения. Небольшие отклонения от линейности значений I_D вызваны их малой величиной, которые находятся в нижнем пределе измерительного оборудования. Значения I_D для структур $\text{Pt}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ не превышают 100 pA при $U = 100$ V, а проводимость определяется законом Ома в рассмотренных электрических полях. Воздействие УФ-излучения с $\lambda = 254$ nm приводит к росту тока на 4–5 порядков. Наиболее заметно изменение фоточувствительности проявляется для более тонких пленок, значения полного тока при освещении I_L

Таблица 1. Значения показателя степени m для тонких пленок Ga_2O_3

$t_g, \text{ min}$		30			60		
$T_{an}, ^\circ\text{C}$		700	800	900	700	800	900
m	I_D	0.96 ± 0.06	1.16 ± 0.01	1.39 ± 0.02	0.69 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.96 ± 0.05
	I_L	1.06 ± 0.01	1.05 ± 0.01	1.09 ± 0.01	1.03 ± 0.01	1.03 ± 0.01	1.05 ± 0.01

Таблица 2. Значения фотоэлектрических характеристик структур $\text{Pt}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ при $U = 100 \text{ V}$

$t_g, \text{ min}$	30			60		
$T_{an}, ^\circ\text{C}$	700	800	900	700	800	900
$I_D, \text{ pA}$	54	106	92	4.4	5.4	3.3
PDCR, a.u.	$8.6 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^5$	$5.2 \cdot 10^5$
$R_\lambda, \text{ mA/W}$	36	88	124	86	124	134
$\eta, \%$	17.5	42.8	60.8	42.2	60.4	65.6
$D^*, \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{0.5}/\text{W}$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$2.7 \cdot 10^{11}$	$4.2 \cdot 10^{11}$	$7.5 \cdot 10^{11}$	$1.7 \cdot 10^{12}$	$2.5 \cdot 10^{12}$

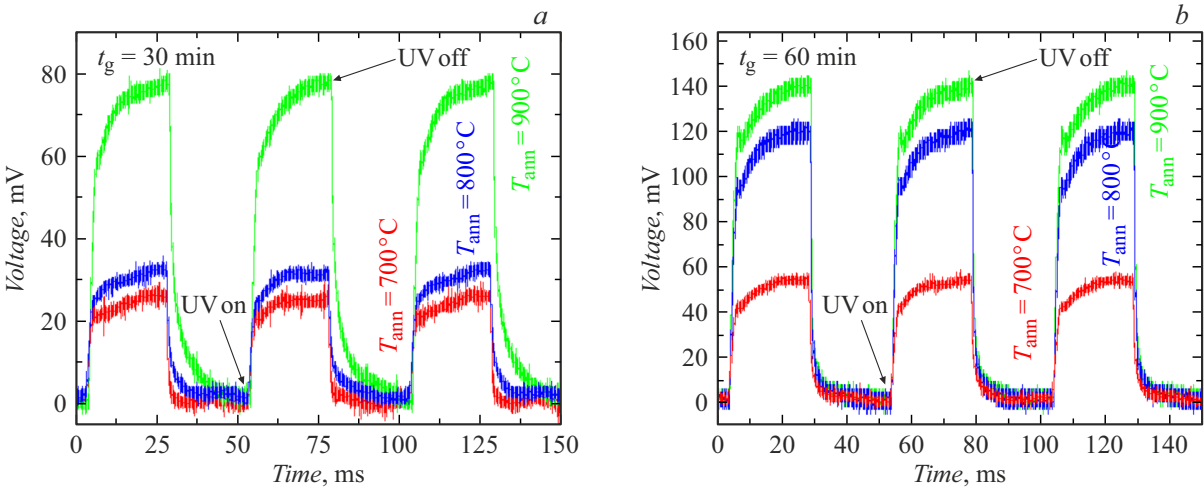


Рис. 5. Осциллограммы структур $\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ при импульсном воздействии УФ-светодиода с $\lambda = 255 \text{ nm}$.

увеличиваются с 9 до 780 nA в диапазоне напряжений от 0 до 100 V. Для фотоприемников с пленками Ga_2O_3 толщиной 390 nm значения I_L растут со 120 до 850 nA в аналогичном интервале напряжений. При этом наибольшая фоточувствительность характерна для структур на основе более толстых пленок, что связано с более высоким поглощением УФ-излучения. Стоит отметить отсутствие классического [7,8] для Ga_2O_3 насыщения фотопроводимости, которое ограничивает работу в широком интервале напряжений.

Из анализа ВАХ были рассчитаны основные фотоэлектрические характеристики, которые сопоставлены для всех серий образцов в табл. 2. Значения R_λ увеличиваются с ростом t_g и T_{an} . Наибольшее влияние толщины пленки на R_λ наблюдается при меньших значениях T_{an} , при $T_{an} = 900^\circ\text{C}$ значения R_λ почти совпадают, но

значения PDCR и D^* изменяются более чем на порядок, что связано с изменением I_D .

Быстродействие фотодетекторов на основе структур $\text{Pt}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ при $U = 10 \text{ V}$ было определено с помощью осциллограмм, представленных на рис. 5. Значения t_r и t_f сопоставлены в табл. 3. Из представленных данных

Таблица 3. Значения постоянных времени t_r и t_f для структур $\text{Pt}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ при $U = 10 \text{ V}$

$t_g, \text{ min}$	30			60		
$T_{an}, ^\circ\text{C}$	700	800	900	700	800	900
$t_r, \text{ ms}$	2.1	5.0	7.2	5.9	5.5	6.1
$t_f, \text{ ms}$	0.6	3.8	5.9	1.6	1.4	2.7

Таблица 4. Фотоэлектрические характеристики MSM-фотоприемников на основе пленок Ga_2O_3 , полученных методом RFMS

Структура	Au/Pt/Ti/Ga ₂ O ₃	Au/Ti/Ga ₂ O ₃				Al/Ga ₂ O ₃	Al/Ga ₂ O ₃
λ , nm	254						
I_D , nA	—	$82 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-3}$	4	0.1	$66.2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^3$
I_{ph} , μ A	57	$3 \cdot 10^{-2}$	6.5	21	0.1	$27.7 \cdot 10^{-3}$	1.5
PDCR, а. у.	—	$3.6 \cdot 10^5$	$9.4 \cdot 10^5$	$5.3 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	419	0.5
R_λ , A/W	48.9	1.9	8.6	46.3	—	$0.8 \cdot 10^{-3}$	20
η , %	$2.4 \cdot 10^4$	927.2	$4.2 \cdot 10^3$	$2.2 \cdot 10^4$	—	0.4	$1 \cdot 10^4$
D^* , cm·Hz _{0.5} /W	$1.4 \cdot 10^{14}$	$6.5 \cdot 10^{13}$	$1.6 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^{13}$	—	—	—
t_r , ms	118	—	390	2820	1830	38680	15200
t_f , ms	31	—	124	320	960	3980	53500
Источник	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]

видно, что существует связь между фоточувствительностью и быстродействием [10]. Структуры Pt/ Ga_2O_3 характеризуются высокой стабильностью и повторяемостью характеристик в импульсном режиме, отсутствует выраженная остаточная фотопроводимость, как было показано ранее [10,11]. Под быстродействием следует понимать сумму t_r и t_f , которая не превышает 10 ms и определяет максимальную частоту приема импульсов фотоприемником без учета вспомогательной электроники.

Результаты исследования фотоэлектрических характеристик структур Pt/ Ga_2O_3 , полученные в настоящей работе, могут быть сопоставлены с ранее опубликованными данными [12–18] (табл. 4). В нескольких работах наблюдаются высокие значения I_D , что приводит к низкому PDCR [15,16,18].

Увеличение T_{an} пленок Ga_2O_3 приводит к росту квантовой эффективности структур Pt/ Ga_2O_3 , что обусловлено фоторезистивным механизмом усиления, суть которого заключается в возрастании времени жизни основных носителей. Объясняется это тем, что повышение температуры отжига Ga_2O_3 способствует повышению качества пленки, тем самым приводя к снижению концентрации исходных дефектов в объеме пленки оксида галлия, которые отвечали за рекомбинацию основных носителей заряда. Помимо этого, с высокой температурой отжига происходит появление новых дефектов, способных давать вклад в фотопроводимость, таких, как вакансии кислорода, которые образуются в процессе отжига в инертной среде [19]. Вероятно, вакансии кислорода дают больший вклад в проводимость более тонких пленок, что проявляется в более высоких значениях I_D [20–22]. Увеличение толщины пленки Ga_2O_3 приводит к росту токовой монохроматической чувствительности за счет более высокого поглощения в активной области структуры.

Условие низких I_D и высоких PDCR является одним из ключевых в реальных условиях работы фотодетектора. Значения R_λ и η характеризуют фоточувствительность фотоприемника и зачастую значительно превышают теоретический максимум для Ga_2O_3 , что связано с внутренним усилением в данном материале. В большинстве случаев фоточувствительность определяется межэлектродным расстоянием, типом и топологией металлического контакта, что позволяет контролировать ее в широком диапазоне. Наиболее часто металлические контакты располагаются на расстоянии единиц и десятков μm [6,7]. Настоящая работа была посвящена быстродействию фотоприемников на основе пленок Ga_2O_3 , поэтому были использованы структуры с относительно большим межэлектродным расстоянием, что позволило значительно повысить быстродействие и общее качество фотоприемников, избегая при этом раннего насыщения фотопроводимости по напряжению.

Заключение

В работе были исследованы фотоэлектрические характеристики фотоприемников на основе структур Pt/ Ga_2O_3 , полученных методом ВЧ-магнетронного распыления. Проведен анализ влияния времени роста пленок и температуры их отжига на оптические и электрические свойства структур. Установлено, что увеличение толщины пленок Ga_2O_3 приводит к росту фоточувствительности, что связано с увеличением коэффициента поглощения в УФ-диапазоне. Анализ ВАХ показал, что структуры Pt/ Ga_2O_3 демонстрируют линейную зависимость тока от напряжения и значительный рост тока при воздействии УФ-излучением. Фотодетекторы обладают высокой стабильностью и повторяемостью характеристик при импульсной засветке излучающим светодиодом, что делает их перспективными для исполь-

зования в быстродействующих системах детектирования. Сравнение полученных данных с литературными источниками показало, что изученные структуры обладают конкурентоспособными характеристиками, включая высокую чувствительность и быстродействие. Выявленная возможность управления фотоэлектрическими параметрами за счет толщины пленки и температуры отжига открывает перспективы дальнейшей оптимизации структур для практического применения в УФ-детекторах нового поколения.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № 2.5.4.25 МЛ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Z. Fei, Z. Chen, W. Chen, S. Chen, Z. Wu, X. Lu, G. Wang, J. Liang, Y. Pei. *J. Alloys Compounds*, **925**, 166632 (2022). DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.166632
- [2] J.A. Spencer, A.L. Mock, A.G. Jacobs, M. Schubert, Y. Zhang, M.J. Tadjer. *Appl. Phys. Rev.*, **9**, 011315 (2020). DOI: 10.1063/5.0078037
- [3] T. Zhao, H. He, C. Wu, L. Lai, Y. Ma, H. Yang, H. Hu, A. Liu, D. Guo, S. Wang. *ACS Appl. Nano Mater.*, **6** (5), 3856 (2023). DOI: 10.1021/acsanm.2c05499
- [4] S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, M.A. Mastro. *Appl. Phys. Rev.*, **5** (1), 011301 (2018). DOI: 10.1063/1.5006941
- [5] D. Kaur, M. Kumar. *Adv. Opt. Mater.*, **9** (9), 2002160 (2021). DOI: 10.1002/adom.202002160
- [6] H. Zhai, Z. Wu, Z. Fang. *Ceram. Intern.*, **48** (17), 24213 (2022). DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.06.066
- [7] X. Chen, F. Ren, S. Gu, J. Ye. *Photon. Res.*, **7** (4), 381 (2019). DOI: 10.1364/PRJ.7.000381
- [8] X. Hou, Y. Zou, M. Ding, Y. Qin, Z. Zhang, X. Ma, P. Tan, S. Yu, X. Zhou, X. Zhao, G. Xu, H. Sun, S. Long. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54** (4), 043001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/abbb45
- [9] T.S. Moss, G.J. Burrell, B. Ellis. *Semiconductor Opto-Electronics* (Halsted Press Division, Wiley, 1973), p. 441.
- [10] V.M. Kalygina, A.V. Tsymbalov, P.M. Korusenko, A.V. Koroleva, E.V. Zhizhin. *Crystals*, **14** (3), 268 (2024). DOI: 10.3390/cryst14030268
- [11] V. Kalygina, A. Tsymbalov, A. Almaev, Ju. Petrova, S. Podzyvalov. *Physica Status Solidi B: Basic Res.*, **259** (2), 2100341 (2021). DOI: 10.1002/pssb.202100341
- [12] X. Gao, T. Xie, J. Wu, J. Fu, X. Gao, M. Xie, H. Zhao, Y. Wang, Z. Shi. *Appl. Phys. Lett.*, **125** (17), 172103 (2024). DOI: 10.1063/5.0227397
- [13] S. Zhou, X. Peng, H. Liu, Z. Zhang, L. Ye, H. Li, Y. Xiong, L. Niu, F. Chen, L. Fang, C. Kong, W. Li, X. Yang, H. Zhang. *Opt. Mat. Expr.*, **12** (1), 327 (2022). DOI: 10.1364/OME.449496
- [14] L. Li, C. Li, S. Wang, Q. Lu, Y. Jia, H. Chen. *J. Semiconductors*, **44** (6), 062805 (2023). DOI: 10.1088/1674-4926/44/6/062805
- [15] M. He, Q. Zeng, L. Ye. *Crystals*, **13** (10), 1434 (2023). DOI: 10.3390/cryst13101434
- [16] J. Wang, L. Ye, X. Wang, H. Zhang, L. Li, C. Kong, W. Li. *J. Alloys Compounds*, **803**, 9 (2019). DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.224
- [17] C. Wang, W.-H. Fan, Y.-C. Zhang, P.-C. Kang, W.-Y. Wu, D.-S. Wu, S.-Y. Lien, W.-Z. Zhu. *Ceram. Intern.*, **49** (7), 10634 (2023). DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.11.251
- [18] K. Arora, N. Goel, M. Kumar, M. Kumar. *ACS Photonics*, **5** (6), 2391 (2018). DOI: 10.1021/acsphotonics.8b00174
- [19] 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/ad8e6e
- [20] S. Cui, Z. Mei, Y. Zhang, H. Liang, X. Du. *Adv. Opt. Mat.*, **5** (19), 1700454 (2017). DOI: 10.1002/adom.201700454
- [21] C. Zhou, K. Liu, X. Chen, J. Feng, J. Yang, Z. Zhang, L. Liu, Y. Xia, D. Shen. *J. Alloys Compounds*, **840**, 155585 (2020). DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155585
- [22] A. Almaev, V. Nikolaev, V. Kopyev, S. Shapenkov, N. Yakovlev, B. Kushnarev, A. Pechnikov, J. Deng, T. Izaak, A. Chikiryaka, M. Scheglov, A. Zarichny. *IEEE Sensors J.*, **23** (17), 19245 (2023). DOI: 10.1109/JSEN.2023.3297127