

**Физические основы разработки
и функционирования элементов силовой
и сенсорной электроники
на основе оксида галлия**

Алексей Викторович Алмаев



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**

Ga_2O_3 : α , β , γ , δ и $\kappa(\epsilon)$

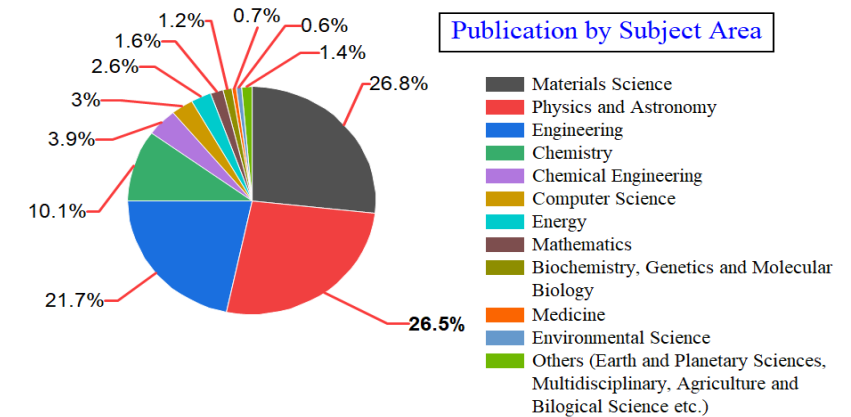
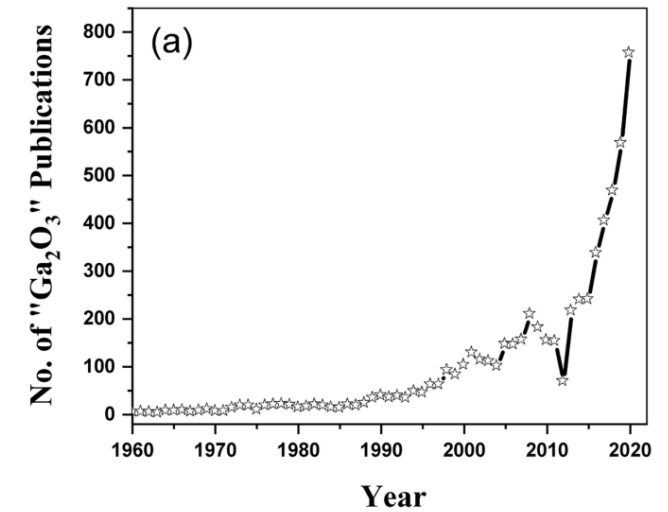
$E_g = 4.5 - 5.3 \text{ eV}$

β - Ga_2O_3 – высокая термическая и химическая стабильности; моноклинная кристаллическая решетка; кристаллы полупроводникового качества.

α - Ga_2O_3 – метастабильная фаза (550 °C, $\alpha \rightarrow \beta$); корундообразная решетка \rightarrow качественные анизотипные гетеропереходы с металлооксидными полупроводниками p-типа (Cr_2O_3 , Ir_2O_3 , Fe_2O_3)

$\kappa(\epsilon)$ - Ga_2O_3 – метастабильная фаза (700 - 1000 °C, $\kappa(\epsilon) \rightarrow \beta$); псевдогексагональная решетка, высокая симметрия; сегнетоэлектрические свойства \rightarrow 2DEG и HEMT; high k.

- MOSFET и SBD для силовой электроники (13.5 kV)
- UVC солнечно – слепые детекторы
- Газовые сенсоры
- TCO

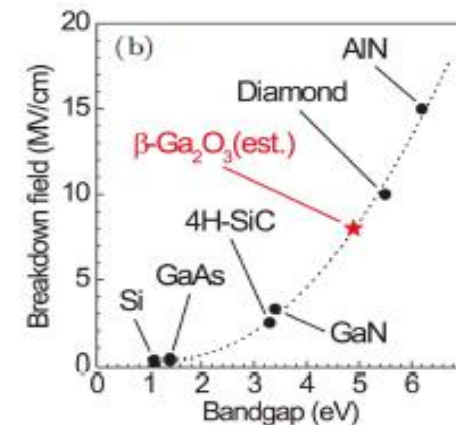
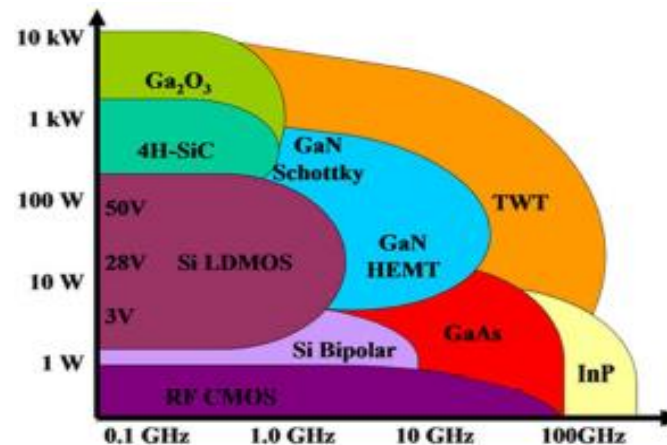


Рост исследовательской активности

Сравнение свойств β -Ga₂O₃ и других широкозонных полупроводников

Параметр	SiC	GaN	Al _{0.7} Ga _{0.3} N	β -Ga ₂ O ₃	Алмаз
E_g , эВ	3.3	3.4	5.8	4.9	5.5
ϵ_c , МВ/см	2.6	3.3	12.7	8	10
μ_n , см ² /(В×с)	1000	1200	310	250	2000
μ_p , см ² /(В×с)	90-120	120	30	n/a	450
λ , Вт/(м×К)	370	130	320	10-30	2000
ϵ	9.7	9	8.9	10	5.5
Размер подложки, ”	8	2, 8 – г/п	2, 3-4 г/п	2-6	1.5
Легирование	n/p	Высокие ΔE_a	Высокие ΔE_a	n до 10^{21} см ⁻³ , p - нет	Высокие ΔE_d и ΔE_a
BFOM, $\epsilon \mu E_g^3, V_{br}^2/R_{on}$	340	870	11773	3214	24660
JFOM, $\epsilon_c v_s/(2\pi)$	278	1089	~2900	2844	1110
KFOM, $\lambda [c v_s / (4\pi \epsilon)]^{0.5}$	3.6	1.8		0.2	41.5

Стоимость коммерческой 2” пластины β -Ga₂O₃ (Tamura corp. – Япония, Dihedral (Shanghai) Science and Technology Co., Ltd - КНР) до 1 млн. рублей.



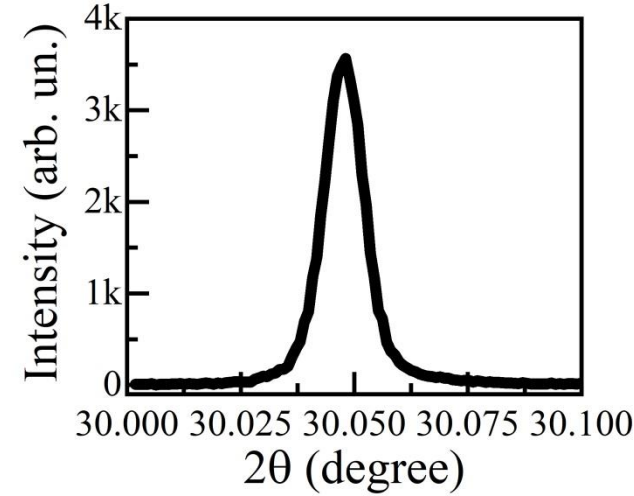
Диод Шоттки на основе Pt/(100) β -Ga₂O₃



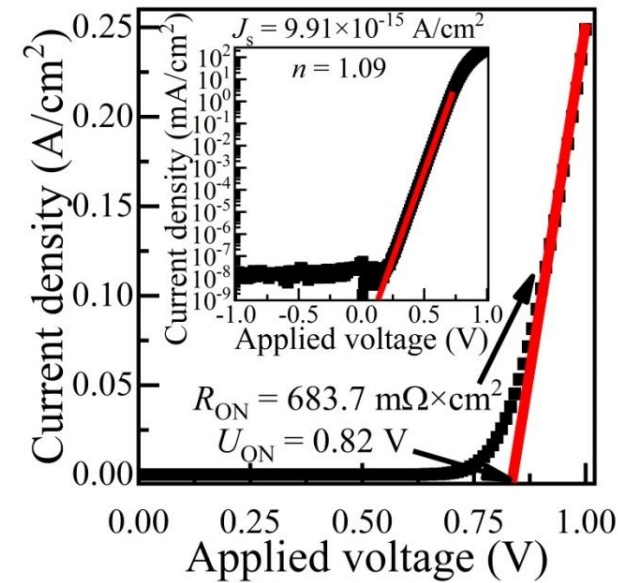
1 cm



Рост β -Ga₂O₃ из расплава, T ~ 1800 °C, 2% O₂ + 98% Ar



РДА (100) β -Ga₂O₃,
выращенного методом
Чохральского



ВАХ диода
Pt/ β -Ga₂O₃

Сравнение электропроводящих характеристик диодов на основе β -Ga₂O₃

Anode	R _{on} (mOhm × cm ²)	n	Φ _b (eV)	U _{on} (V)	Rectification ratio	J _s (A/cm ²)	Refs.
Au/Pt	1.83	1.05	1.24	0.9	10 ⁹	5 × 10 ⁻¹⁵	C. Xie, et al. J.Mater.Sci.Technol. 72, 189 (2021)
Ti/SnO _x	60	1.02	1.19	–	> 10 ¹⁰	–	L. Du, et al. IEEE Electr.DeviceLett. 40, 451 (2019)
Au/Ni	190 Ohm × mm	–	–	0.85–0.9	10 ⁷ – 10 ⁸	–	Z. Hu, et al. IEEE J.Electr.DevicesSoc. 6, 815 (2018)
Au/Ti/Pt	7.85	1.06	1.52	–	–	6 × 10 ⁻¹⁹	K. Sasaki, et al. IEEE Electr.DeviceL. 34, 493 (2013)
Au/W	10.5	1.02	1.07	–	> 10 ⁶	–	M. Xian, et al. J.Vac.Sci.Technol.B 37, 061201 (2019)
Au/Ni	6	1.08	1.1	–	–	–	J. Yang, et al. Appl.Phys.Lett. 110, 192101 (2017)
Ti/Pt	5.1	1.03	1.46	–	–	–	K. Konishi, et al. Appl.Phys.Lett. 110, 103506 (2017)
Au/Ti/Pt	4	1.02	–	1	< 10 ¹⁰	–	X. Lu, et al. Phys.StatusSolidiA. 217, 1900497 (2020)
Pt	12.5	1.1	1.38	1.07	–	2 × 10 ⁻¹⁶	Q. He, et al. Appl.Phys.Lett. 110, 093503 (2017)
Pt	683.7	1.09	1.69	0.82	10¹⁰	9.91 × 10⁻¹⁵	This work

R_{on} - сопротивление в открытом состоянии;

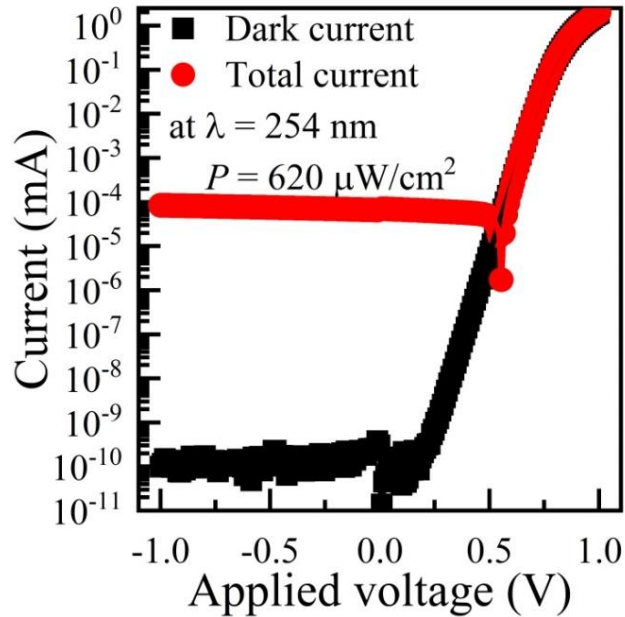
n - коэффициент идеальности;

Φ_b - высоты барьера Шоттки;

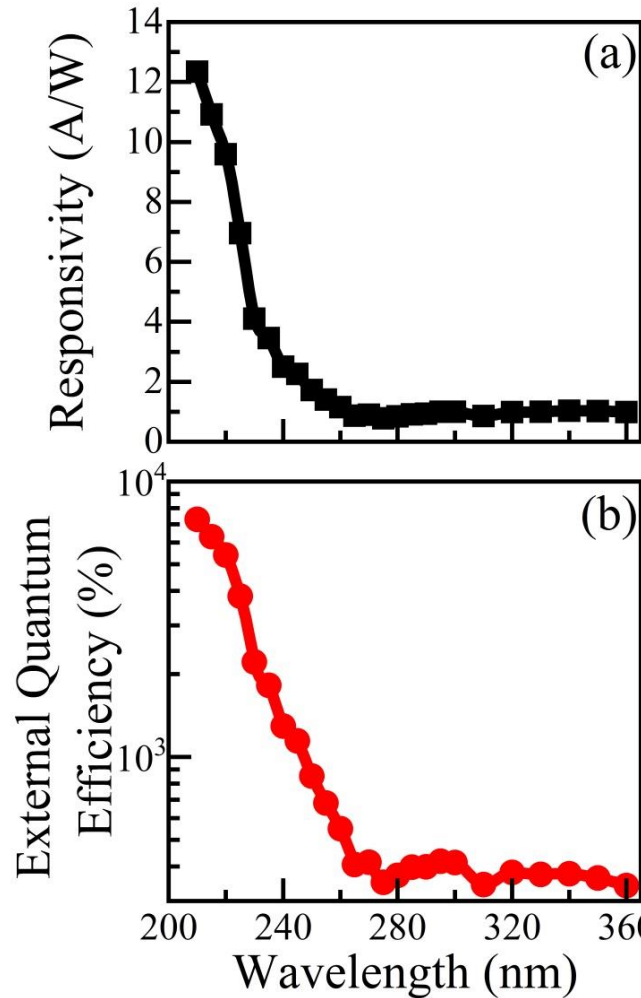
U_{on} - напряжение включения;

J_s - ток насыщения.

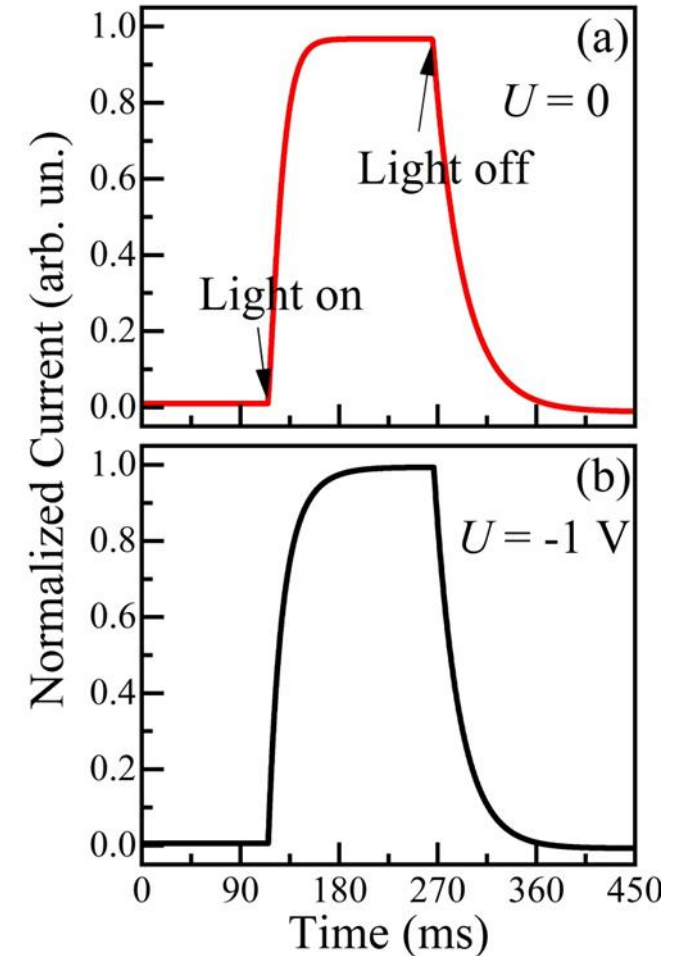
Фотоэлектрические характеристики Шоттки на основе Pt/(100) β -Ga₂O₃



ВАХ диода Pt/ β -Ga₂O₃
в темновых условиях при
воздействии УФС излучения



Спектральные зависимости фотоэлектрических
характеристик диодов при нулевом смещении



Временные зависимости
полного тока диода при
воздействии УФС $\lambda = 250$ нм

Сравнение фотоэлектрических характеристик диодов на основе Ga₂O₃

Material	Responsivity (A/W)	τ_r/τ_d (ms)	Bias (V)	Ref.
β -Ga ₂ O ₃	4×10^{-3}	90/410	0	A. S. Pratiyush, et al. IEEE Photonic. Tech. L. 30, 2025 (2018)
α -Ga ₂ O ₃	1021.8	144/208	-5	X. Jiet al. J. Alloy Compd. 933, 167735 (2023)
β -Ga ₂ O ₃	2.34	$-/29.38 \times 10^3$	-10	D. H. Vieira, et al. IEEE T. Electron Dev. 67, 4947 (2020)
β -Ga ₂ O ₃	0.6	320/270	-1.2	T. Zhang, et al. Nanoscale Res. Lett. 15, 163 (2020)
β -Ga ₂ O ₃	67	970/210	-5	P. Mukhopadhyay, W. V. Schoenfeld, J.Vac.Sci.Technol.A. 38, 013403 (2020)
α -Ga ₂ O ₃	0.23×10^{-6}	240/-	0	S. Wang, et al. Sensor. Actuat. A-Phys. 330, 112870 (2021)
β -Ga ₂ O ₃	3.7×10^{-2}	9/9	0	T. Oshima, et al. Jap. J. Appl. Phys. 48, 011605 (2009)
β -Ga ₂ O ₃	12.3	14/30	0	This work

τ_r - время нарастания фотоотклика;
 τ_d - время спада фотоотклика.

Исследование газовой чувствительности различных полиморфов Ga₂O₃

Polymorph	Predominant mechanism of the sensory effect	T _{oper} (°C)	Gas (the highest sensitivity)	Effective ways to modify gas sensitivity		
				Sn impurity	Si ⁺ and Fe ⁺ ion implantation	+ other metal oxide
α-Ga ₂ O ₃	Modulation of potential barrier at Pt/α-Ga ₂ O ₃	25–400	H ₂	+	+	-
β-Ga ₂ O ₃	Chemisorption	250–750	H ₂ , O ₂ , NO ₂ , NH ₃ , toluene	?	+	+
	O Vacancies	25 + UV 600–900				
κ(ε)-Ga ₂ O ₃	Chemisorption	25–600	H ₂ , O ₂ , NO ₂ ,	+	+	+
α-/κ(ε)-Ga ₂ O ₃	Chemisorption, modulation of potential barrier at Pt/α-Ga ₂ O ₃ and α-/κ(ε)-Ga ₂ O ₃	25–250	H ₂ , O ₂	+	?	-

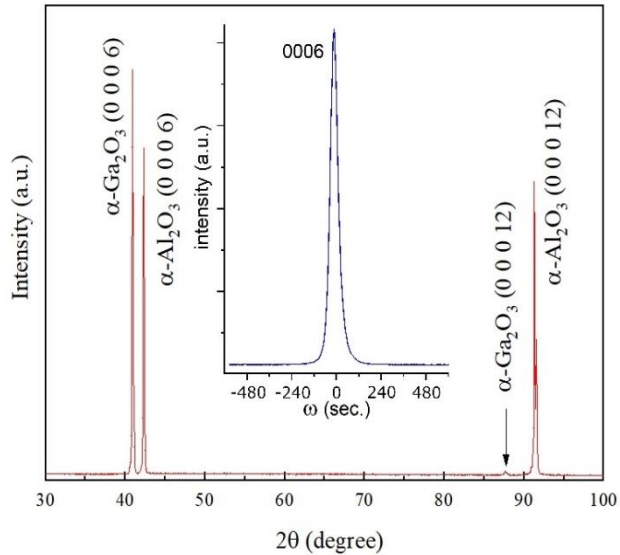
16 публикаций за 2020 – 2024 (Sensors and Actuators B: Chemical, IEEE Sensors Journal, Materials Today Communications, Superlattices and Microstructures, Physica Status Solidi (b), Journal of Vacuum Science & Technology A, ПЖТФ, ФПП).

185 ссылок.

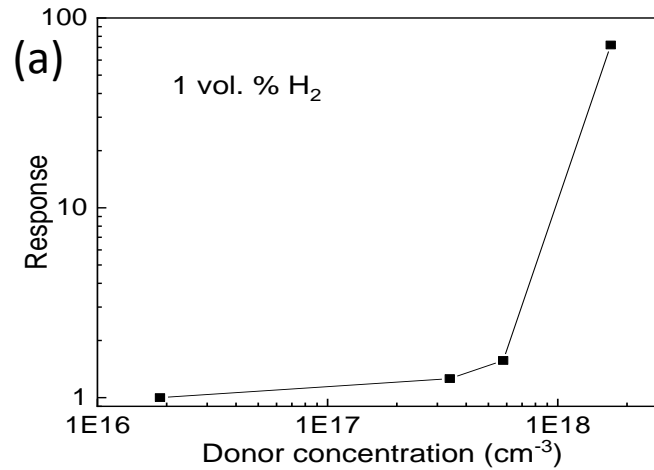
РНФ № 20-79-10043, № 20-79-10043-П, «Газовые сенсоры на основе полиморфных структур оксида галлия»

РФФИ № 18-32-00456, «Исследование газовой чувствительности оксида галлия»

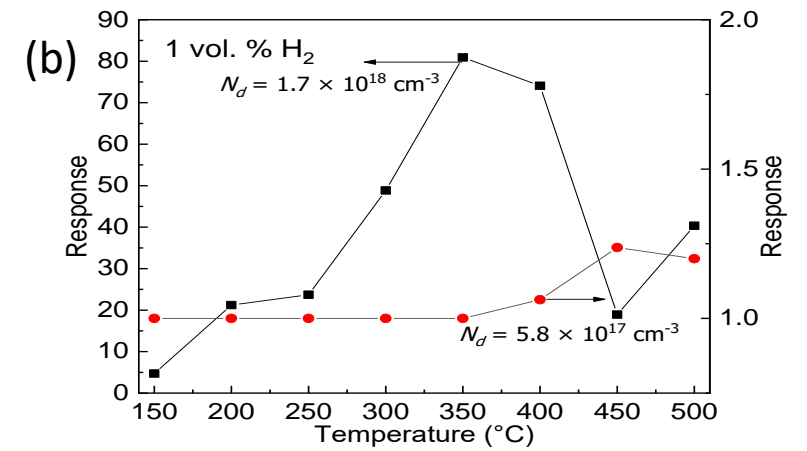
Сенсоры водорода на основе структур Pt/ α -Ga₂O₃:Sn/Pt



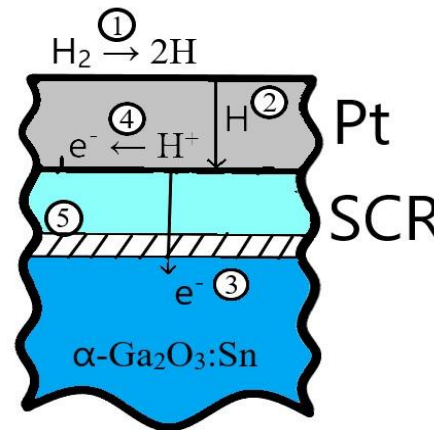
РДА спектр плёнки α -Ga₂O₃, выращенной методом HVPE



Зависимости откликов на водород от концентрации доноров (N_d) при $T = 400^\circ\text{C}$ (a) и от температуры при фиксированных N_d (b)

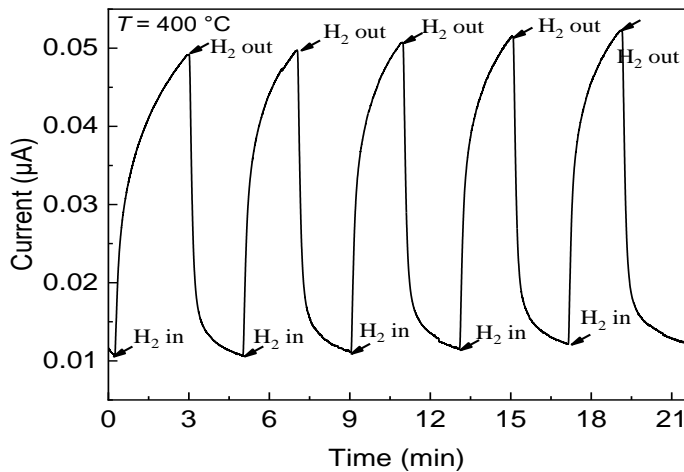


Механизм чувствительности

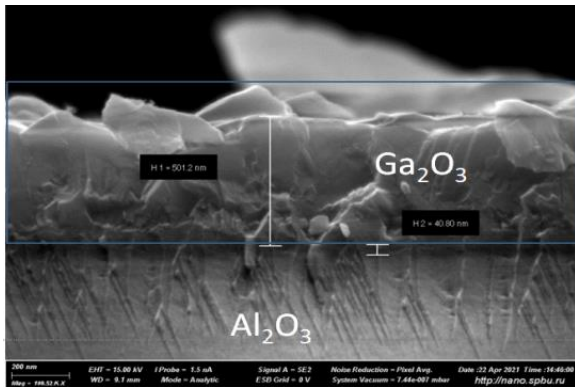
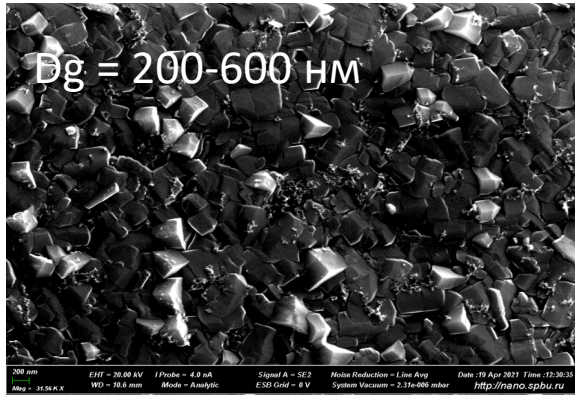


- (1) - диссоциативная адсорбция молекул H₂ на поверхности Pt;
- (2) - диффузия атомов H через слой Pt к гетерогранице Pt/ α -Ga₂O₃:Sn;
- (3) - формирование ионов H⁺;
- (4) - локализация иона H⁺ на ПС⁻;
- (5) - уменьшение ОПЗ.

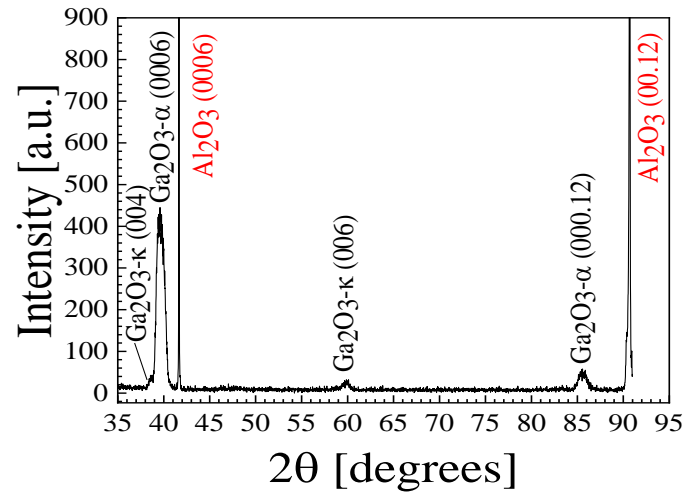
Временная зависимость силы тока при циклическом воздействии H₂



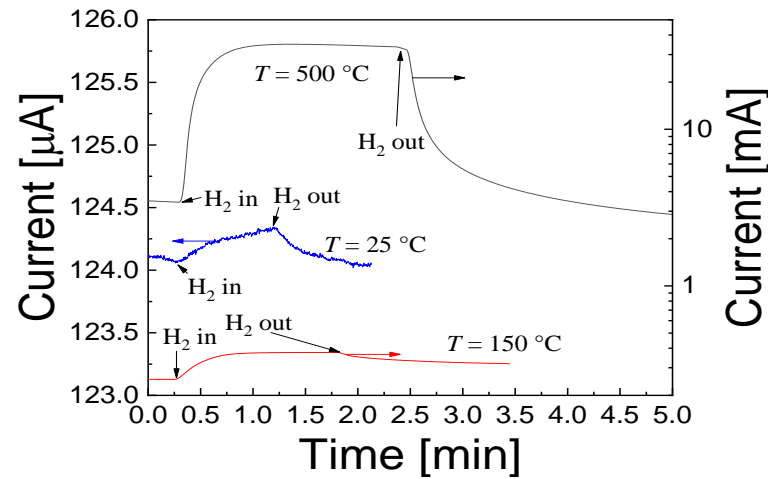
Газовые сенсоры на основе псевдогексагональной фазы оксида галлия



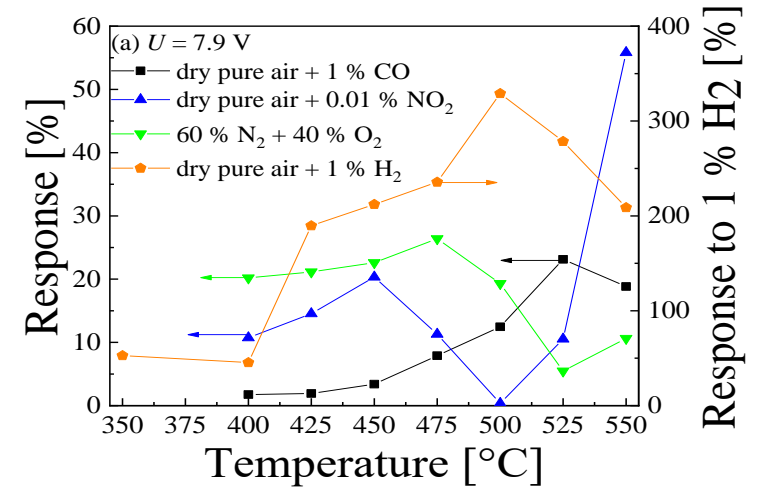
СЭМ снимки поверхности и скола $\epsilon(k)$ -Ga₂O₃



РДА спектр $\epsilon(k)$ -Ga₂O₃

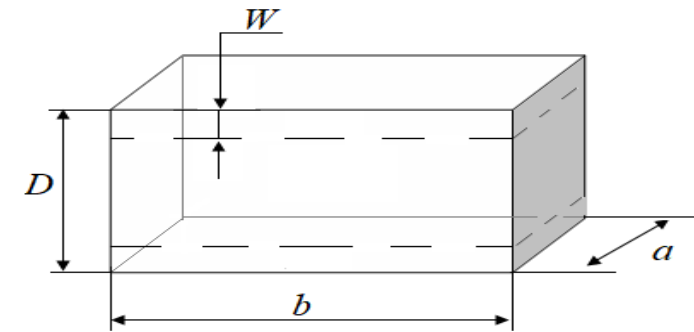


Временные зависимости силы тока плёнок $\epsilon(k)$ -Ga₂O₃:Sn при воздействии 1 % H₂



Температурная зависимость откликов плёнок $\epsilon(k)$ -Ga₂O₃ на разные газы

Механизм чувствительности



$$e\phi_s \sim N_O^2$$

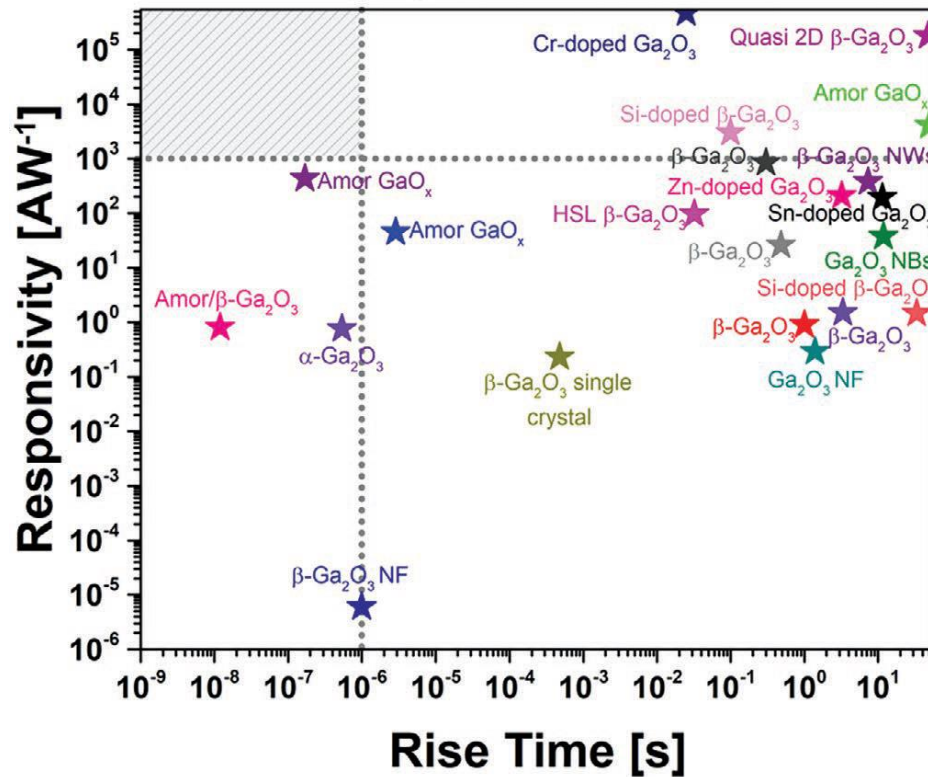
$$W = L_D [2e\phi_s / (kT)]^{0.5}$$

$$G = G_0 \times (1 - 2W/D)$$

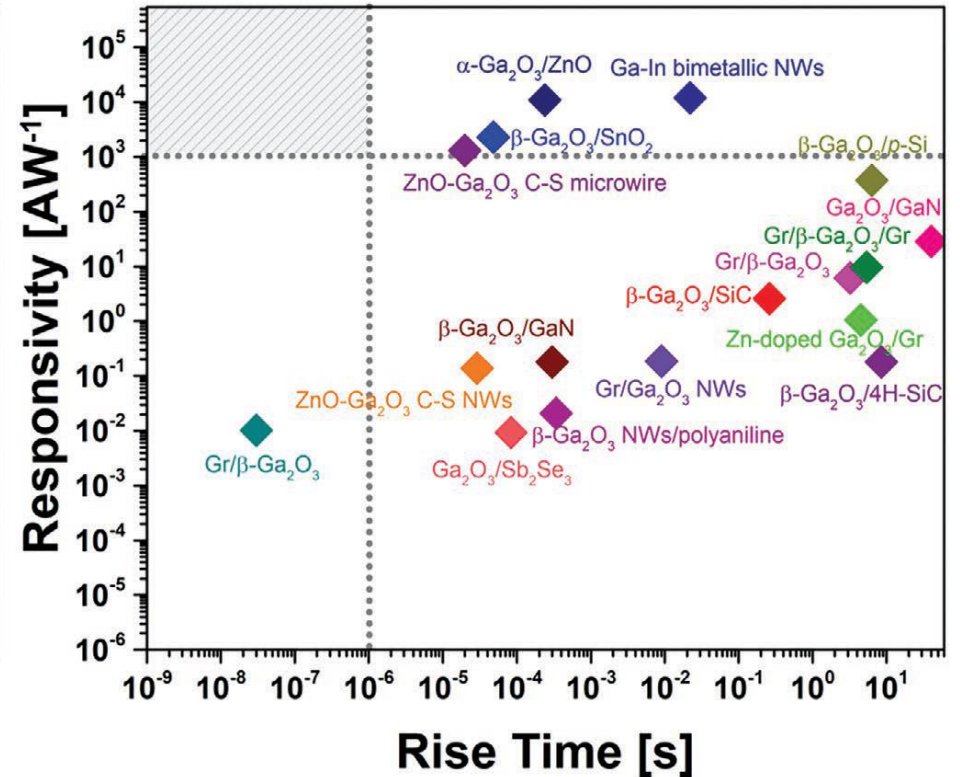
Солнечно-слепые детекторы ультрафиолетового излучения на основе плёнок метастабильных фаз оксида галлия

- Детектирование излучения с длиной волны $\lambda \leq 280$ нм (область UVC).
- Переходы зона-зона.

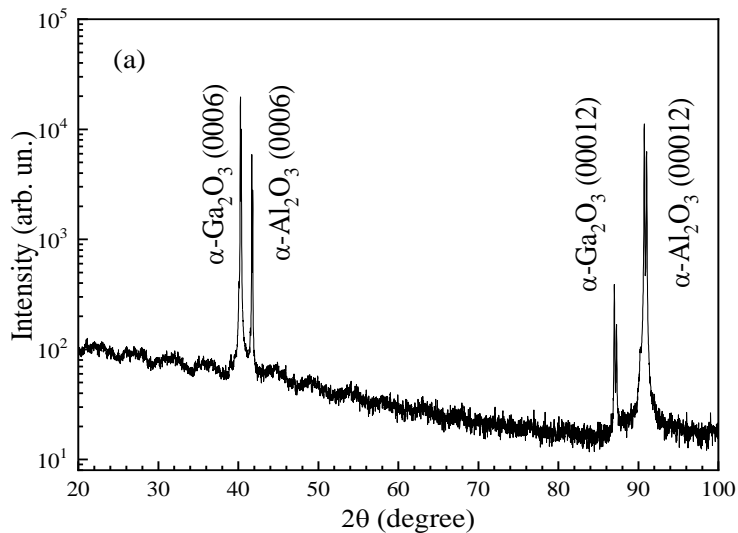
(a) Ga₂O₃ based SBPD



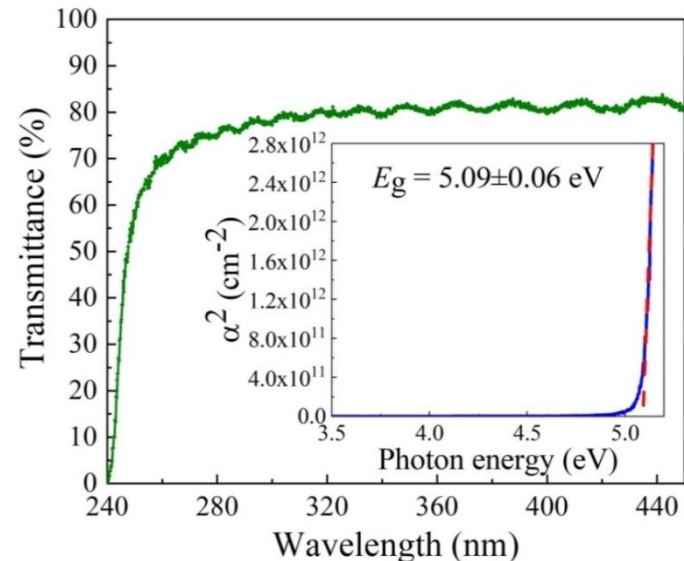
(b) Ga₂O₃ Heterostructures based SBPD



Солнечно-слепые детекторы ультрафиолета на основе HVPE плёнок $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ с гигантской чувствительностью

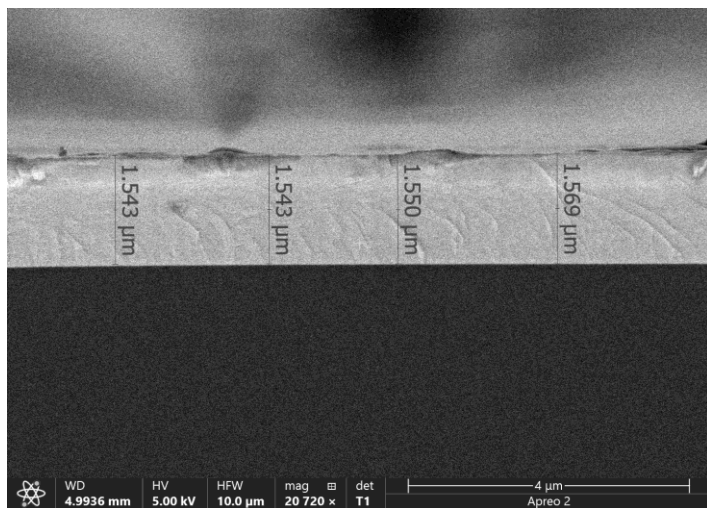


РДА спектр плёнки $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, выращенной методом HVPE

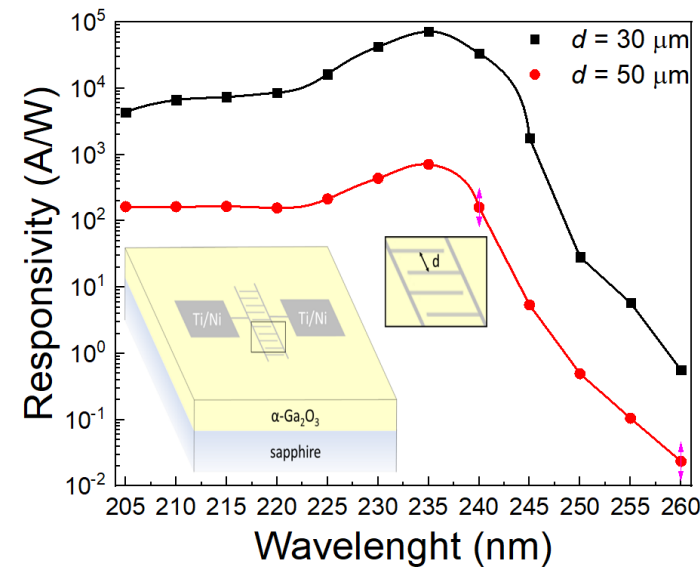


Спектр пропускания плёнок

СЭМ снимок скола плёнок



Спектр токовой чувствительности плёнок



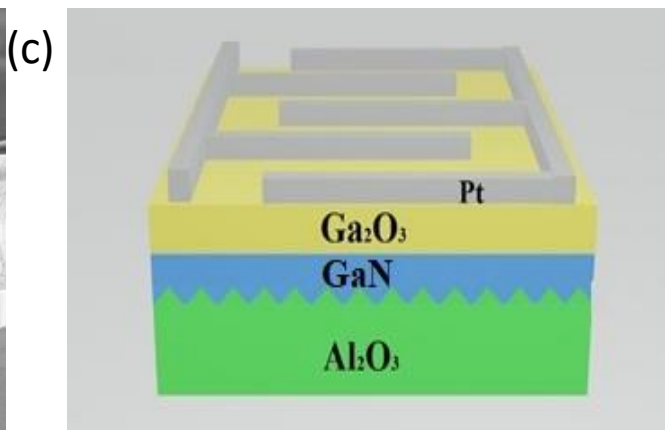
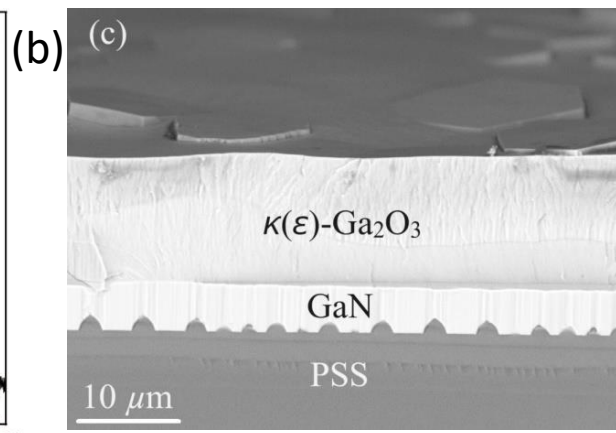
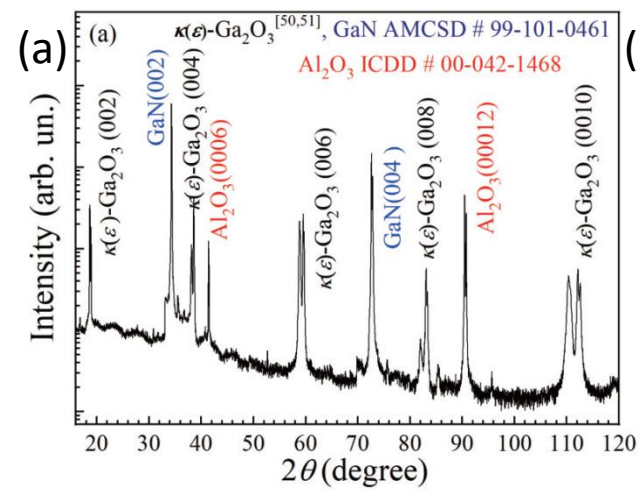
Сравнение фотоэлектрических характеристик детекторов на основе альфа фазы оксида галлия и коммерческих образцов

Material	Producer	Type	I_D (nA)	λ (nm)	R (A/W)	$\Delta\lambda$ (nm)
α -Ga ₂ O ₃	Our (30 μ m)	MSM	10^{-2} (10 V)	235	$\sim 7 \times 10^4$	190–260
Si	MarkTech	PN	0.2 (5 V)	250	0.1	250–1000
Si	Hamamatsu	APD	0.1 (1 V)	250	~ 8	200–1000
Si	Laser Components	APD	0.2	260	20–60	260–1000
Si	OSI	PN	-	254	0.09–0.14	200–1100
Si	Optodiode	PN	1 (6 V)	254	0.08–0.09	200–1100
Si	Thorlabs	PN	0.3–1	280	0.05	200–1100
Si	Edmund	PN	0.3–1	200	0.12	200–1100
Si	Lasermate	PIN	10^{-3} – 10^{-2}	218	0.08	200–1100
Si	ACIA Politekhnik	PN	≤ 0.2 (0.01 V)	235	0.1061	190–1180
SiC	Roithner LaserTechnik	PN	10^{-6} (1 V)	268–290	0.01–0.1	210–380
SiC	Boston electronics	PN	10^{-6} (1 V)	275–280	0.1	200–400
SiC	Electro Optical Components	PN	10^{-5} (1 V)	265	0.13	210–380
SiC	MarkTech	PN	10^{-6} (1 V)	265	0.18	200–360
AlGa _N	Roithner LaserTechnik	SBD	1 (0.1 V)	254	0.07	220–280
AlGa _N	Electro Optical Components	SBD	1 (0.1 V)	254	0.06	210–280

MSM – металл/полупроводник/металл (фоторезистор); PN – PN фотодиод; APD – лавинный фотодиод; PIN – PIN диод; SBD – диод Шоттки. I_D - темновой ток; R - токовая чувствительность; $\Delta\lambda$ - диапазон длин волн.

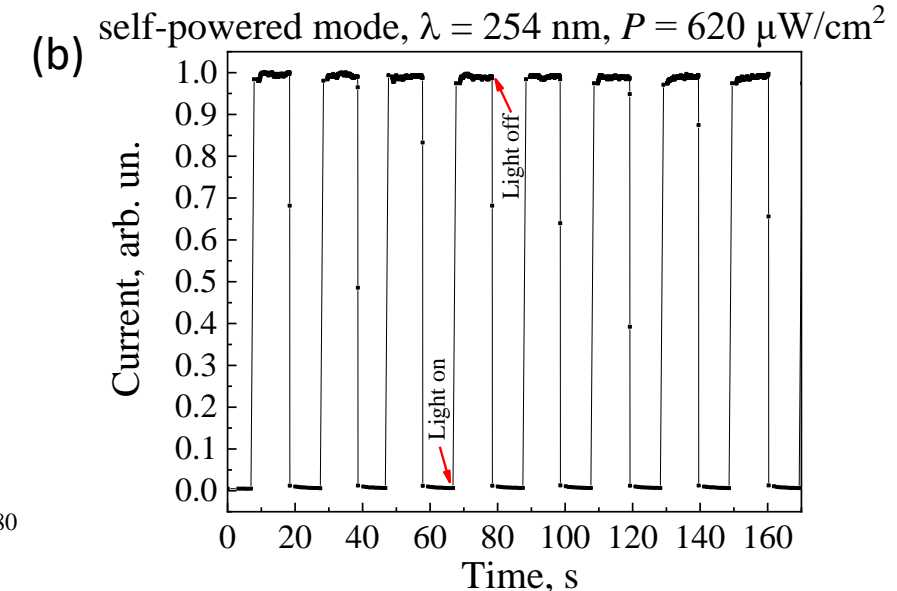
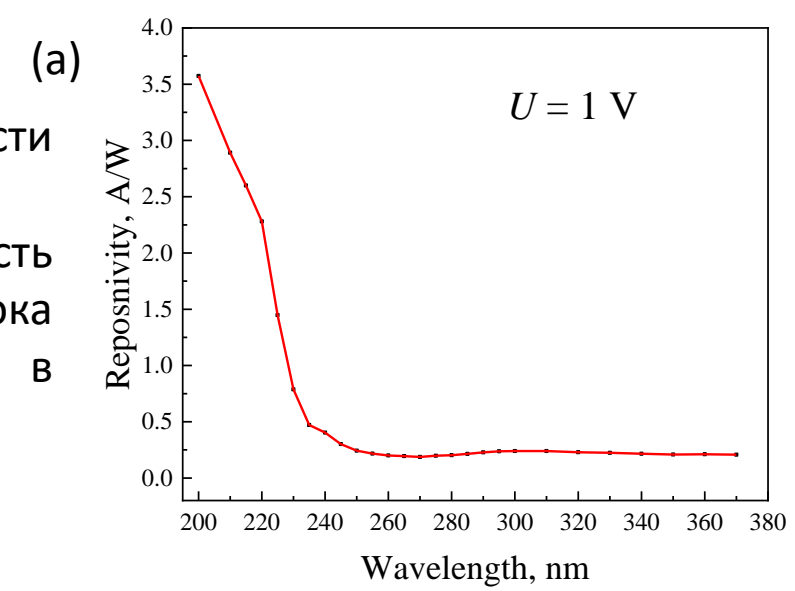
Almaev A., Nikolaev V., Kopyev V., Shapenkov S., Yakovlev N., Kushnarev B., Pechnikov A., Deng J., Izaak T., Chikiryaka A., Scheglov M., Zarichny A. Solar-blind ultraviolet detectors based on high-quality HVPE α -Ga₂O₃ films with giant responsivity // IEEE Sensors Journal. 2023. V. 23, No 17. P. 19245-19255. 10.1109/JSEN.2023.3297127

Быстродействующие автономные детекторы коротковолнового ультрафиолетового излучения на основе плёнок $\kappa(\epsilon)$ -Ga₂O₃



(a) РДА спектр плёнок,
(b) СЭМ скола структуры,
(c) конструкция детектора

(a) Спектр токовой чувствительности при смещении 1 В,
(b) Временная зависимость нормализованного полного тока при воздействии УФ излучения в фотовольтаическом режиме



Сравнение фотоэлектрических характеристик детекторов на основе оксида галлия при воздействии излучения с $\lambda = 254$ нм в фотовольтаическом режиме

Materials	Structure	Responsivity, mA/W	Rise time, ms	Decay time, ms	References
ϵ -Ga ₂ O ₃ /GaN	Heterojunction	43.9 @ 0 V	120	440	Chen T.W. et al, Adv Photonics Res, 2021 , 2(8), 2100049
Pt/a-Ga ₂ O ₃ /ITO	Schottky	3690 @ 0 V	27	11	Ye L.Y. et al, Opt Express, 2023 , 31, 28200
Pt/ $\kappa(\epsilon)$ -Ga ₂ O ₃ /Pt	MSM	0.9 @ 0 V	< 100	< 100	OUR
Au/ β -Ga ₂ O ₃ Nanowires	Schottky	0.01 @ 0 V	1×10^{-3}	6×10^{-2}	Chen X. et al, ACS Appl Mater Interfaces, 2016 , 8, 4185
NiO/a-Ga ₂ O ₃	Heterojunction	0.147 @ 0 V	200	2510	Wang Y.C. et al, ACS Appl Electron Mater, 2020 , 2, 2032
β -Ga ₂ O ₃ /CuGaO ₂	Heterojunction	0.025 @ 0 V	260	140	Wu C. et al, Mater Today Phys, 2021 , 17, 100335
β -Ga ₂ O ₃ /GaN	Heterojunction	28.4 @ 0 V	140	70	Li P.G. et al, J Mater Chem C, 2017 , 5, 10562
Pt/Sn _x Ga _{1-x} O/ Pt	MSM	6.9 @ 2 V	60	180	Mondal A. et al, Nanotechnology, 2020 , 31, 294002
Pt/Au/ β -Ga ₂ O ₃ / Pt/Au	MSM	11.6×10^{-3} @ 0 V	1780	2090	Tak B.R. et al, Sci Rep, 2020 , 10, 16098
CuO/ β -Ga ₂ O ₃	Heterojunction	30.3 @ 0 V	12	14	Park S. et al, Nanomaterials, 2023 , 13, 954

Вместо заключения

Цикл работ показывает перспективность данного материала для многих направлений электроники. В ближайшие 10-20 лет приборы на основе Ga_2O_3 могут заменить или составить конкуренцию приборам на основе традиционных полупроводников. На данном этапе, исследования ведутся широким фронтом для выявления главного направления работ. Стоит отметить, что результаты исследований, представленные в указанных работах, получены для плёнок и пластин Ga_2O_3 , выращенных в России.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Алексей Викторович Алмаев,
Канд. физ.-мат. наук,
зав. лаборатории металлооксидных полупроводников
Центра исследований и разработок
«Перспективные технологии в микроэлектронике» НИТГУ
almaev_alex@mail.ru