

08

Влияние термического отжига на свойства гетероструктур Ga₂O₃/GaAs:Cr

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: Kalygina@ngs.ru

Поступило в Редакцию 2 июня 2023 г.

В окончательной редакции 8 сентября 2023 г.

Принято к публикации 11 сентября 2023 г.

Приведены данные о чувствительности гетероструктур Ga₂O₃/GaAs:Cr к длинноволновому и ультрафиолетовому ($\lambda = 254 \text{ nm}$) излучению. Образцы получены высокочастотным магнетронным напылением пленки оксида галлия на не нагретые подложки GaAs:Cr. Пластины арсенида галлия с пленкой Ga₂O₃ делили на две части: одну половину не подвергали отжигу, а вторую отжигали в аргоне при 500°C в течение 30 min. Независимо от наличия или отсутствия термообработки исследованные структуры проявляли фотовольтаический эффект и способны работать в автономном режиме. Показано, что заметная чувствительность к длинноволновому излучению появляется в образцах только после термического отжига пленок оксида галлия. Времена отклика и восстановления таких детекторов УФ излучения не превышают 1 s.

Ключевые слова: темновой ток, фототок, ультрафиолетовое излучение, структуры Ga₂O₃/GaAs:Cr, автономный режим работы, отжиг.

DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56495.140-23

Введение

Оксиды представляют собой материалы с высоким потенциалом использования для создания новых поколений электронных устройств, включая различного рода сенсоры и фотоприемники глубокого ультрафиолета (УФ), преимущество которых заключается в прямом преобразовании УФ излучения в электрический сигнал. Особый интерес представляют приборы, способные работать в автономном режиме. Такие фотодетекторы имеют простое устройство и, что особо важно, предполагают прямую интеграцию с технологией изготовления структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП).

Среди оксидных соединений большое внимание привлекают полупроводниковые оксиды (In₂O₃, Ga₂O₃, Al₂O₃) и их тройные сплавы, поскольку они имеют широкую запрещенную зону в диапазоне от 3.7 eV для In₂O₃ до 8.9 eV для Al₂O₃ и подходят для разработки многих устройств, таких, как силовые диоды и транзисторы, датчики газа и УФ фотодетекторы. Большинство технологических и научных исследований до сих пор направлены на изучение Ga₂O₃, поскольку это соединение имеет термодинамически стабильные полиморфные фазы и его легко получить в виде монокристаллов [1], тонких эпитаксиальных слоев [2] и наноструктуры [3].

Свойства пленок оксида галлия и характеристики границы металл/Ga₂O₃ и гетероперехода полупроводник/Ga₂O₃ зависят как от способа получения, толщины нанесенных слоев [4], давления газовой смеси в процессе изготовления [5,6], так и от последующих технологических обработок [7,8]. В свою очередь, процессы на этих границах определяют электрические и оптические

характеристики структур на основе тонких слоев оксида галлия. Практический интерес представляют гетероструктуры на основе Ga₂O₃/GaAs, что объясняется низкой плотностью состояний на интерфейсе, которая может достигать $D_{it} = 1 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ [9,10]. Помимо этого, большая подвижность электронов в арсениде галлия позволяет создавать приборы с высоким быстродействием [11,12].

На сегодняшний день структуры на основе Ga₂O₃/GaAs являются малоизученными, поэтому в настоящей работе стоит задача исследования влияния термического отжига на свойства данных гетероструктур.

1. Методика эксперимента

В настоящей работе исследованы электрические и фотоэлектрические характеристики структур Ga₂O₃/GaAs:Cr. В качестве подложки использовали

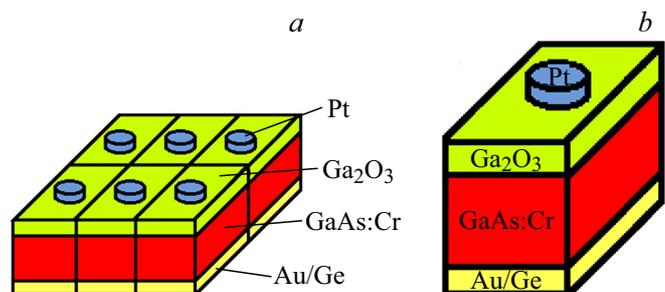


Рис. 1. Структуры ВЧ Ga₂O₃/GaAs:Cr: подложка GaAs с нанесенными слоями Ga₂O₃ и металлическими контактами (a); вид от отдельного образца (b).

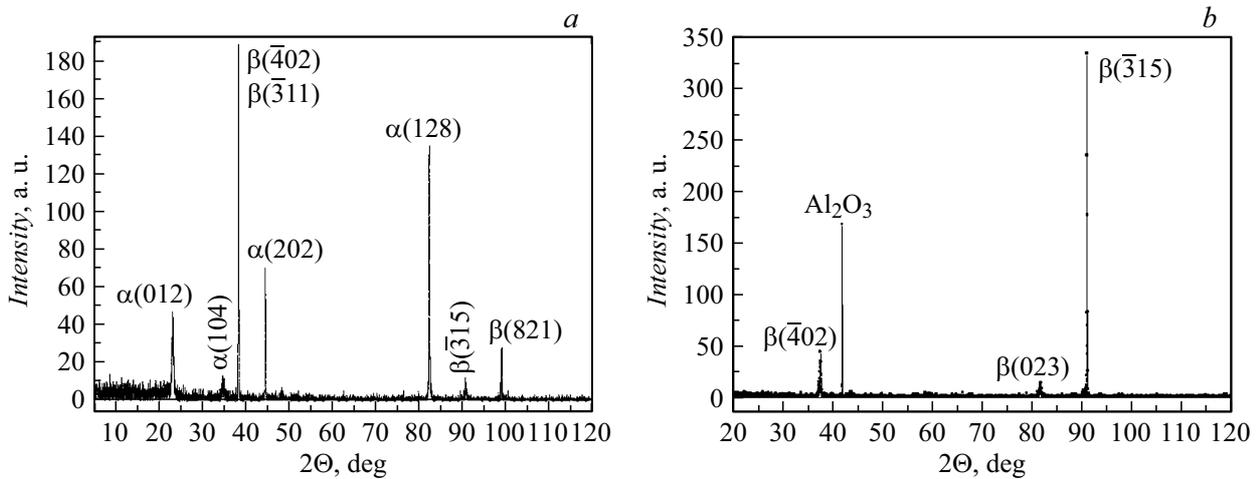


Рис. 2. Спектры РДА пленок оксида галлия: *a* — без отжига; *b* — после отжига в Ar при 900°C.

слои *n*-GaAs с ориентацией (100), легированные хромом, с удельным сопротивлением $10^9 \Omega\text{-cm}$, (рис. 1).

Пленку оксида галлия толщиной 120–150 nm получали ВЧ магнетронным рапылением мишени Ga₂O₃ (3N) на ненагретые подложки GaAs:Cr на установке AUTO-500 (производитель Edwards) в газовой смеси Ar/O₂. Концентрация кислорода в смеси поддерживалась равной $56.1 \pm 0.5 \text{ vol.}\%$. Расстояние между мишенью и подложкой составляло 70 mm. Давление в камере во время напыления поддерживалось равным 0.7 Pa. После нанесения оксида подложку с пленкой Ga₂O₃ делили на две части: одна часть образцов не подвергалась термической обработке, а вторую половину отжигали в аргоне при 500°C в течение 30 min. Структуру и фазовый состав пленок оксида галлия определяли методом рентгеновского дифракционного анализа (РДА) с использованием установки Lab-X XRD 6000 Shimadzu X-Ray diffractometer.

Для измерений электрических характеристик на поверхность Ga₂O₃ и тыловую сторону полупроводниковой подложки наносили контакты: электрод к полупроводнику создавали в виде сплошной металлической пленки (Au/Ge), а электрод к оксиду галлия наносили напылением Pt через маски (рис. 1). Площадь контакта к Ga₂O₃ оставляла $1.04 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$.

Темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ВАХ при воздействии излучения исследовали при комнатной температуре с помощью источников-измерителей Keithley 2611B и Keithley 2636A. В качестве источника УФ излучения использовалась криптон-фторовая лампа VL-6.C с фильтром на 254 nm. Расстояние между лампой и образцом составляло 1 cm, интенсивность излучения равнялась 0.78 mW/cm^2 . Исследования влияния длинноволнового излучения проводили, используя свет белых светодиодов с общей мощностью $3 \cdot 10^{-3} \text{ W}$, либо лазер с $\lambda = 532 \text{ nm}$.

2. Экспериментальные данные и их обсуждение

2.1. Результаты рентгеноструктурного анализа

На рис. 2 представлены результаты рентгеновского дифракционного анализа пленок оксида галлия без (рис. 2, *a*) и после отжига в инертной среде при 900°C (рис. 2, *b*). Можно считать, что нанесенная оксидная пленка без термической обработки представляет собой аморфную матрицу, в которую включены отдельные кристаллиты α- и β-фазы Ga₂O₃ с разной кристаллографической ориентацией (рис. 2, *a*). После отжига в аргоне в течение 30 min пленка становится полностью кристаллической и содержит только кристаллиты β-фазы (рис. 2, *b*).

Усиление рефлексов в спектрах РДА пленок оксида галлия с повышением температуры отжига наблюдалось в работе X. Zhang с сотрудниками [13].

2.2. Электрические и фотоэлектрические характеристики образцов без отжига

Темновые ВАХ структур Ga₂O₃/GaAs:Cr несимметричны относительно полярности напряжения (рис. 3). Коэффициент выпрямления при $U = \pm 1 \text{ V}$ равен 4.7. Прямые ветви ВАХ наблюдаются при отрицательных потенциалах на затворе. Плотность обратного темнового тока (I_D) при $U = +4.5 \text{ V}$ составляет $4 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2$. Таким образом, GaAs:Cr в исследованных структурах проявляет свойства полупроводника *p*-типа проводимости.

При воздействии УФ излучения с $\lambda = 254 \text{ nm}$ наблюдается рост токов независимо от знака потенциала на затворе (рис. 4, кривая I_{L1}).

При последующей подаче напряжения на структуру во время непрерывного действия УФ излучения фототоки

увеличиваются, а затем стабилизируются (рис. 4, кривые I_{L2} – I_{L4}). Более высокие значения фототока получены при положительных потенциалах на затворе (рис. 5).

Из анализа данных рис. 4 и 5 следует, что при воздействии коротковолнового излучения токи I_L на порядок и более превышают темновой ток образцов как при отрицательных, так и при положительных потенциалах на затворе. Это позволяет использовать такие структуры в качестве детекторов УФ излучения. Наличие отклика при U = 0 V говорит о возможности работы таких фотодиодов в автономном режиме. В таблице приведены значения напряжения холостого хода U_{idl.} и тока короткого замыкания I_{sh.cir.} для нескольких образцов.

Величина контраста, определяемая отношением светового тока к темновому (I_L/I_D), зависит от напряжения на образце (рис. 6).

Из данных рис. 6 следует, что структуры Ga₂O₃/GaAs:Cr наиболее целесообразно использовать в

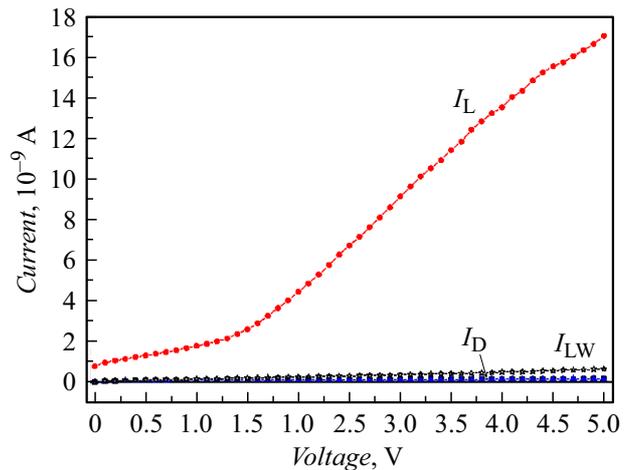


Рис. 5. ВАХ образца Ga₂O₃/GaAs:Cr при положительных потенциалах на затворе: темновая (I_D), во время действия УФ излучения с λ = 254 nm (I_L), при воздействии действия излучения трех белых светодиодов (I_{LW}).

Значения U_{idl.} и I_{sh.cir.} структур Ga₂O₃/GaAs:Cr при воздействии УФ излучения с λ = 254 nm

№ образца	U _{idl.} , V	I _{sh.cir.} , A
1	0.82	1.72 · 10 ⁻⁹
2	0.80	8.0 · 10 ⁻⁹
3	0.95	1.3 · 10 ⁻⁸
4	0.82	7.4 · 10 ⁻⁹
5	0.97	9.3 · 10 ⁻¹⁰

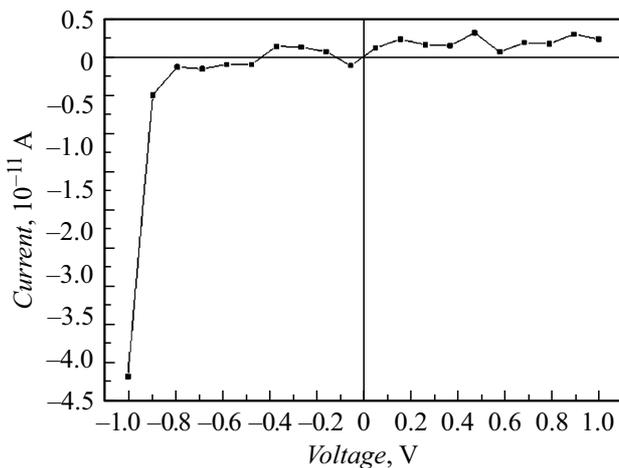


Рис. 3. Темновая ВАХ структуры Ga₂O₃/GaAs:Cr без отжига.

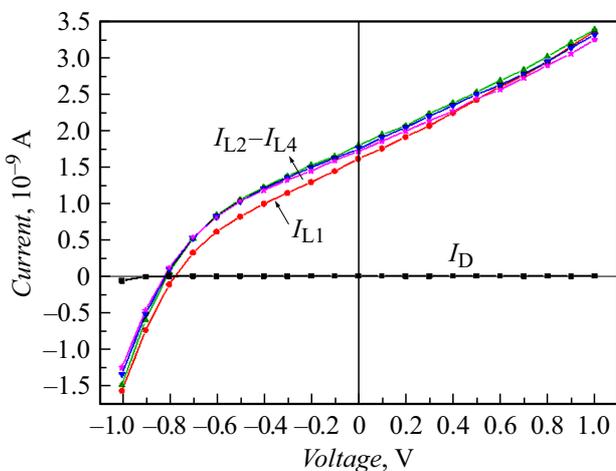


Рис. 4. ВАХ образца Ga₂O₃/GaAs:Cr: темновая (I_D) при положительных и отрицательных потенциалах на затворе и при включении УФ излучения с λ = 254 nm (I_{L1} – I_{L4}).

качестве детекторов УФ излучения при положительных потенциалах на контакте к оксидной пленке.

Образцы без отжига слабо чувствительны к белому свету с высокой интенсивностью и поэтому их можно считать солнечно-слепыми. На рис. 5 приведены значения темнового тока (I_D), измеренного при положительных потенциалах на затворе, фототока при воздействии излучения с λ = 254 nm (I_L) и при освещении образца белыми светодиодами (I_{LW}) с мощностью 3 · 10⁻³ W со стороны оксидной пленки. При U = 5 V фототок I_L = 1.7 · 10⁸ A, в то время как I_{LW} = 6.3 · 10⁻¹⁰ A.

Однако если подложки GaAs:Cr с напыленным слоем оксида галлия отжечь в аргоне при 500°C в течение 30 min, то структуры Ga₂O₃/GaAs:Cr оказываются чувствительными к длинноволновому излучению.

2.3. Электрические и фотоэлектрические характеристики образцов после отжига

На рис. 7 приведены темновые ВАХ (I_D, I_{D1}) и ВАХ при освещении образцов со стороны оксидной пленки излучением с λ = 254 nm (I_L) и белым светом с мощностью 3 · 10⁻³ W (I_{LW}). Кривая I_{D1} соответствует

темновому току, измеренному сразу после выключения УФ.

Аналогичным образом структуры реагируют на воздействие лазером большой мощности с $\lambda = 532 \text{ nm}$. На рис. 8 показано влияние излучения с $\lambda = 532 \text{ nm}$ на ВАХ образцов без отжига ($I_{L532 \text{ nm}}$) и после отжига в аргоне в течение 30 min при 500°C ($I_{L532 \text{ nm}}^{\text{an}}$).

Подобное влияние отжига на чувствительность структур Ga_2O_3 /полупроводник к видимому излучению наблюдалось нами ранее для образцов $\text{Ga}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ с анодной пленкой оксида галлия [7].

Отжиг при повышенной температуре влияет не только на оптические свойства структур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$, но приводит к изменению типа проводимости GaAs:Cr. После отжига высокоомная подложка GaAs:Cr в гетероструктурах $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$ проявляет свойства полупроводника

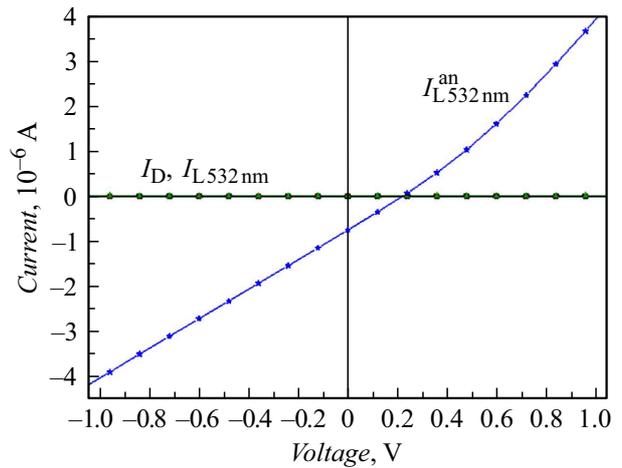


Рис. 8. Зависимости тока от напряжения структур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$ с пленкой оксида галлия до и после отжига при 500°C : темновой ток без отжига (I_D); ток при освещении светом с $\lambda = 532 \text{ nm}$ образца без отжига ($I_{L532 \text{ nm}}$); ток образца после отжига во время действия излучения с $\lambda = 532 \text{ nm}$ ($I_{L532 \text{ nm}}^{\text{an}}$).

n -типа проводимости: независимо от длины падающего излучения, напряжение холостого хода наблюдается при положительных потенциалах на затворе (рис. 7, 8).

В фотодетекторах на основе структур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$ практически отсутствуют остаточные токи, которые нередко наблюдаются в различного рода устройствах, способных обнаруживать УФ излучение [14–16]. Временные параметры образцов, исследованных в настоящей работе, характеризуются малыми временами отклика (t_r) и восстановления (t_d). На рис. 9 приведены импульсы изменения тока при напряжении на образце $U = 3 \text{ V}$ при включении и выключении излучения с $\lambda = 254 \text{ nm}$.

Время нарастания (t_r) и время спада (t_d) фототока не превышают 1 s, что подтверждается данными рис. 9, *b*, и поэтому можно считать, что структуры $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$ обладают высоким быстродействием. Более высокая чувствительность структур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$ к длинноволновому излучению после отжига объясняется повышением коэффициента пропускания оксидной пленки (около 80%) (рис. 10).

В свою очередь, повышение коэффициента пропускания T пленок оксида галлия после отжига может быть связано с переходом Ga_2O_3 из частично аморфного в поликристаллическое состояние.

Заключение

Исследованы структуры $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$, в которых в качестве подложки использованы слои высокоомного арсенида галлия, полученного диффузией Cr в n -GaAs. Образцы обнаруживают чувствительность к УФ излучению с $\lambda = 254 \text{ nm}$ и малочувствительны к длин-

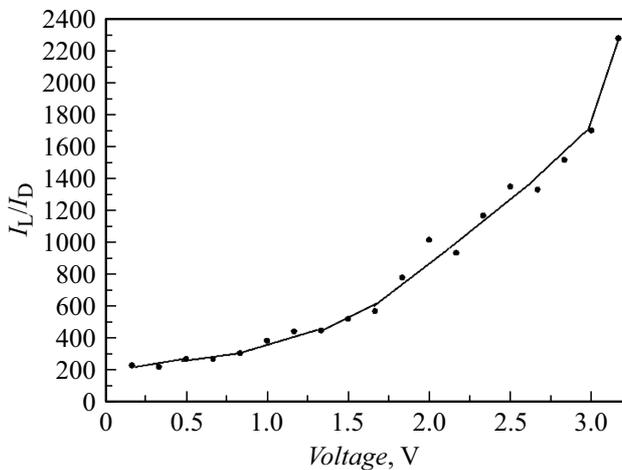


Рис. 6. Зависимость отношения I_L/I_D от напряжения (положительные потенциалы на Pt-электроде).

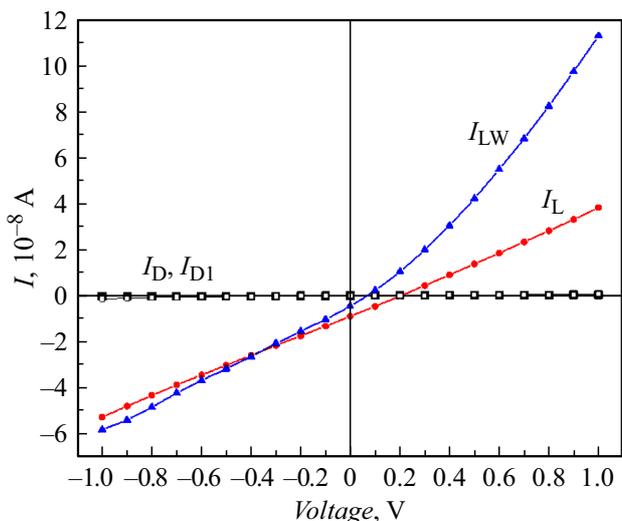


Рис. 7. ВАХ структур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs:Cr}$ с пленкой оксида галлия после отжига при 500°C : темновой ток (I_D); ток во время действия излучения с $\lambda = 254 \text{ nm}$ (I_L); темновой ток после выключения УФ (I_{D1}); ток при освещении белым светом (I_{LW}).

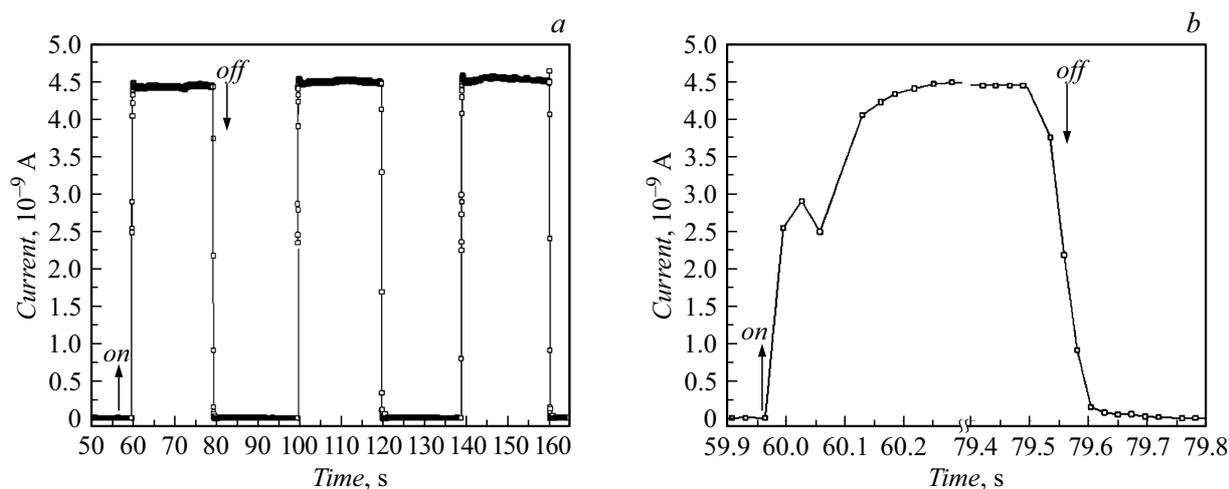


Рис. 9. Временные зависимости изменения тока в структуре Ga₂O₃/GaAs:Cr при включении и выключении излучения с $\lambda = 254$ nm: *a* — временной профиль тока для трех импульсов; *b* — начало и конец первого импульса в более подробном масштабе.

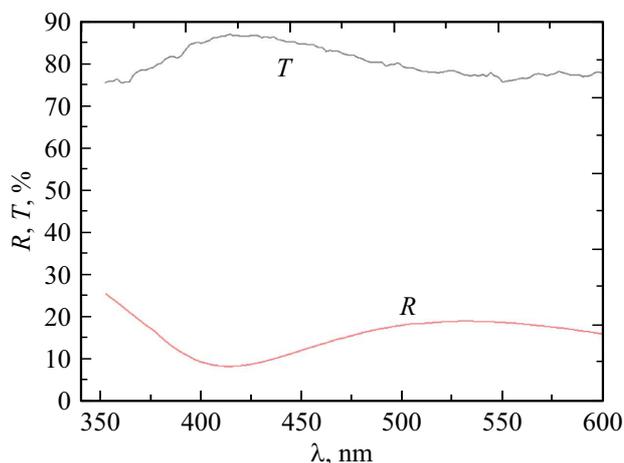


Рис. 10. Спектры пропускания (*T*) и отражения (*R*) пленки Ga₂O₃ после отжига.

новолновому излучению при условии, что пленки оксида галлия, нанесенные на поверхность GaAs:Cr, не подвергаются отжигу при повышенных температурах. Времена отклика и восстановления таких детекторов УФ не превышают 1 с.

Финансирование работы

Исследования выполнены при поддержке гранта по постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.)

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Mi, J. Ma, Z. Li, C. Luan, H. Xiao. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*, **26**, 7889 (2015). DOI: 10.1007/s10854-015-3440-2
- [2] Y. Zhang, F. Alema, A. Mauze, O.S. Koksaldi, R. Miller, A. Osinsky, J.S. Speck, *APL Mater.*, **7**, 022506 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5058059>
- [3] T. Uchida, R. Jinno, S. Takemoto, K. Kaneko, S. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57** (4), 040314 (2018). DOI: 10.7567/JJAP.57.040314
- [4] X. Wang, Z. Chen, D. Guo, X. Zhang, Z. Wu, P. Li, W. Tang. *Opt. Mater. Express*, **8** (9), 2918 (2018). <https://doi.org/10.1364/OME.8.002918>
- [5] Z. Li, Z. An, Y. Xu, Y. Cheng, Y. Cheng, D. Chen, Q. Feng, S. Xu, J. Zhang, C. Zhang, Y. Hao. *J. Mater. Sci.*, **54**, 10335 (2019).
- [6] M.-Q. Lia, N. Yanga, G.-G. Wanga, H.-Y. Zhanga, J.-C. Hana. *Appl. Surf. Sci.*, **471**, 694 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.045>
- [7] В.М. Калыгина, В.В. Вишниккина, Ю.С. Петрова, И.А. Прудяев, Т.М. Яскевич. *ФТП*, **49** (3), 357 (2015).
- [8] J. Yua, J. Louc, Z. Wang, S. Jic, J.Chend, M. Yub, B. Peng, Y. Hu, L. Yuan, Y. Zhang, R. Jia. *J. Alloys Compd.*, **872**, 159508 (2021).
- [9] M. Hong, J.P. Mannaerts, J.E. Bower, J. Kwo, M. Passlack, W.-Y. Hwang, L.W. Tu. *J. Cryst. Growth*, **175**, 422 (1997).
- [10] M. Holland, C.R. Stanley, W. Reid, R.J.W. Hill, D.A.J. Moran, I. Thayne, G.W. Paterson, A.R. Long. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **25**, 1706 (2007). <https://doi.org/10.1116/1.2778690>
- [11] J. Hwang, C.C. Chang, M.F. Chen, C.C. Chen, K. Lin, F.C. Tang, M. Hong, J. Kwo. *J. Appl. Phys.*, **94** (1), 348 (2003).
- [12] P.D. Ye, G.D. Wilk, B. Yang, J. Kwo, G. Chu, S. Nakahara, J.P. Mannaerts, M. Hong, K.K. Ng, J.D. Bu. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (1), 180 (2003).
- [13] X. Zhang, D. Jiang, M. Zhao, H. Zhang, M. Li, M. Xing, J. Han, A.E. Romanov. *J. Phys.: Conf. Series*, **1965**, 012066 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1965/1/012066.

- [14] B.R. Tak, M.-M. Yang, M. Alexe, R. Singh. *Cryst.*, **11** (9), 1046 (2021). <https://doi.org/10.3390/cryst11091046>
- [15] L. Huang, Q. Feng, G. Han, F. Li, X. Li, L.Fang, X. Xing, J. Zhang, Y. Hao. *IEEE Photon. J.*, **9** (4), 6803708 (2017).
- [16] Y. Qin, S. Long, H. Dong, Q. He, G. Jian, Y. Zhang, X. Hou, P. Tan, Z. Zhang, H. Lv, Q. Liu, M. Liu. *Chin. Phys. B*, **28** (1), 018501 (2019). DOI: 10.1088/1674-1056/28/1/018501