

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ТОНКИХ ПЛЁНОК ОКСИДА ГАЛЛИЯ К КОРОТКОИМПУЛЬСНОМУ ИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Ж.К. Койшыбаева<sup>1)</sup>, С.К. Павлов<sup>2)</sup>, Ф.В. Конусов<sup>2)</sup>, Д.В. Сиделёв<sup>2)</sup>, А.Р. Насырбаев<sup>2)</sup>,  
Д.Л. Чешев<sup>2)</sup>, Р.М. Гадиров<sup>3)</sup>, В.А. Тарбоков<sup>2)</sup>, Е.Ф. Полисадова<sup>2)</sup>, А.Т. Акилбеков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
ул. Сатпаева 2, Астана 010008, Республика Казахстан,  
zhanymgul.k@gmail.com, akilbekov\_at@enu.kz

<sup>2)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия, lab.sergey@gmail.com, konusov@tpu.ru,  
sidelevdv@tpu.ru, arn1@tpu.ru, dimascabal@gmail.com, tarbokovv@tpu.ru, elp@tpu.ru

<sup>3)</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
пр. Ленина 36, Томск 634050, Россия, grm882@ngs.ru

В работе изучены оптические и фотоэлектрические свойства тонких плёнок оксида галлия, полученные методом реактивного магнетронного распыления. Проведено сравнение осаждённых покрытий с покрытиями, подвергнутыми дополнительному отжигу на воздухе (900 °С, 2 часа). Определено структурное состояние и фазовый состав тонких плёнок, получены спектральные зависимости показателя поглощения плёнок, определена ширина запрещённой зоны и энергия Урбаха. Определена величина поверхностной темновой и фотопроводимости. Определена полевая и спектральная зависимость фоточувствительности плёнок. В докладе будут представлены результаты влияния короткоимпульсного ионного облучения (энергия ионов – до 200 кэВ, длительность импульса – 90 нс, плотность тока на мишени – до 15 А/см<sup>2</sup>) на структуру, оптические и фотоэлектрические характеристики синтезированных плёнок.

**Ключевые слова:** оксид галлия; тонкие плёнки; радиационная стойкость; магнетронное распыление; короткоимпульсное ионное воздействие; радиационные дефекты; оптические свойства.

## RADIATION RESISTANCE TO SHORT-PULSED ION IRRADIATION OF THIN GALLIUM OXIDE FILMS

Zhanymgul Koishybayeva<sup>1)</sup>, Sergey Pavlov<sup>2)</sup>, Fedor Konusov<sup>2)</sup>, Dmitrii Sidelev<sup>2)</sup>,  
Artur Nassyrbayev<sup>2)</sup>, Dmitry Cheshev<sup>2)</sup>, Ruslan Gadyrov<sup>3)</sup>, Vladislav Tarbokov<sup>2)</sup>,  
Elena Polisadova<sup>2)</sup>, Abdirash Akilbekov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev Str., 010008 Astana,  
Republic of Kazakhstan; zhanymgul.k@gmail.com, akilbekov\_at@enu.kz

<sup>2)</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina Ave., 634050 Tomsk, Russia,  
lab.sergey@gmail.com, konusov@tpu.ru, sidelevdv@tpu.ru, arn1@tpu.ru,  
dimascabal@gmail.com, tarbokovv@tpu.ru, elp@tpu.ru

<sup>3)</sup>National Research Tomsk State University,  
36 Lenina Ave., 634050 Tomsk, Russia, grm882@ngs.ru

In this work, the optical and photoelectric properties of thin films of gallium oxide deposited by reactive magnetron sputtering have been studied. The deposited coatings were compared with coatings subjected to additional annealing in air (900 °C, 2 hours). The structural state and phase composition of thin films are determined, the spectral dependences of the absorption coefficient of the films are obtained, the band gap and the Urbach energy are determined. The value of the surface dark and photoconductivity has been determined. The field and spectral dependences of the photosensitivity of the films are determined. The report will present the results of the influence of short-pulsed ion irradiation (ion energy - up to 200 keV, pulse duration - 90 ns, current density on the target - up to 15 A/cm<sup>2</sup>) on the structure, optical and photoelectric characteristics of the synthesized films.

**Keywords:** gallium oxide; thin films; radiation resistance; magnetron sputtering; short-pulsed ion irradiation; radiation defects; optical properties.

## Введение

Оксид галлия моноклинной модификации  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  имеет ширину запрещенной зоны 4.9 эВ и является перспективным материалом для различных электронных и оптоэлектронных устройств, в том числе для фотоприемников УФ-излучения [1]. Тонкие плёнки на основе  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  получают различными способами в том числе и методом магнетронного распыления. Известно, что электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе пленок оксида галлия зависят от способа изготовления, от свойств материала подложки и последующих технологических обработок. Учитывая потенциальное применение таких структур, радиационная стойкость и стабильность оптических и фотоэлектрических свойств при воздействии потоков ионизирующего излучения имеет существенное значение.

В данной работе исследованы структурные, оптические и фотоэлектрические характеристики плёнок оксида галлия, осажденных на сапфировые подложки методом магнетронного распыления, определено влияние термического отжига на свойства плёнок.

## Методика эксперимента

Напыление тонких плёнок оксида галлия выполнялось на вакуумной установке, оснащённой ионным источником и высокочастотной (ВЧ) магнетронной распылительной системой (13.56 МГц). Остаточное давление в камере составляло  $2 \times 10^{-3}$  Па, в качестве подложек использовались полированные сапфировые подложки  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  с ориентацией (0001). Подложки были закреплены на планетарном подложкодержателе. Первоначально подложки травились пучком ионов аргона с помощью ионного источника (ускоряющее напряжение – 3 кВ, ток пучка – 45 мА, давление аргона – 0.12 Па) в течение 15 мин. Далее выполнялось осаждение покрытий из поликристаллической  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  мишени (диаметр – 90 мм, чистота – 99.99%) при мощности ВЧ магнетрона 300

Вт в смеси аргона и кислорода при соотношении потоков как 20/18  $\text{см}^3/\text{мин}$ . Время осаждения покрытий – 90 мин. Серия образцов после осаждения покрытий была подвергнута отжигу на воздухе при 900 °С в течении 2 ч.

Структура тонких плёнок была исследована методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Установлено, что покрытия после осаждения имеют аморфную структуру (рис. 1 и 2).

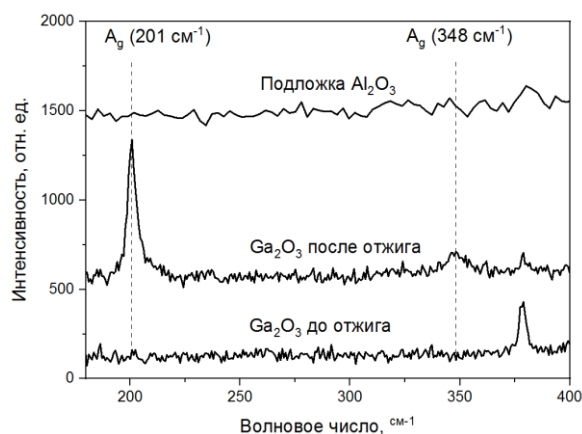


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света от подложки (1) и образцов до (2) и после (3) отжига. Длина волны возбуждения – 532 нм

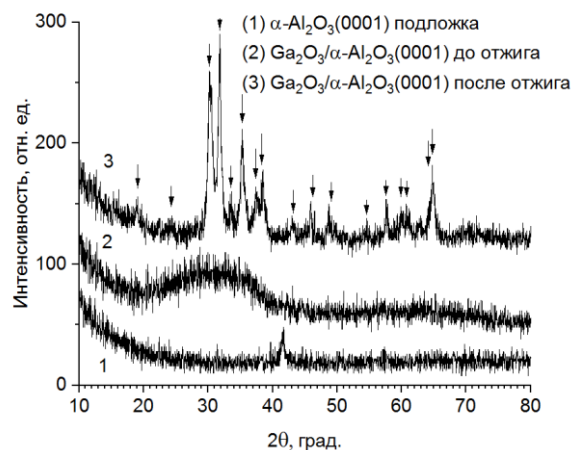


Рис. 2. Рентгенограммы подложки (1) и образцов до (2) и после (3) отжига. Стрелками отмечены положения рефлексов, соответствующих фазе  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$

После отжига в покрытии формируется фаза  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , о чём свидетельствует появление характерных пиков  $A_g$  (201 и 348  $\text{см}^{-1}$ ) на спектрах комбинационного рассеяния света (рис. 1) и рефлексов на рентге-

нограммах (рис. 2). Других фаз оксида галлия в покрытиях после отжига по результатам рентгеноструктурного анализа не установлено. Природа пика  $378\text{ см}^{-1}$  на спектрах комбинационного рассеяния света не установлена.

Спектральная зависимость коэффициента поглощения  $\alpha(h\nu)$  покрытий, осажденных на сапфировую подложку (рис. 3), рассчитывалась по спектральной зависимости оптической плотности по формуле  $\alpha(h\nu) = D(h\nu)/d$ , где  $d$  – толщина покрытия,  $D(h\nu)$  – разностная величина между оптической плотностью пленки на подложке и оптической плотностью подложки.

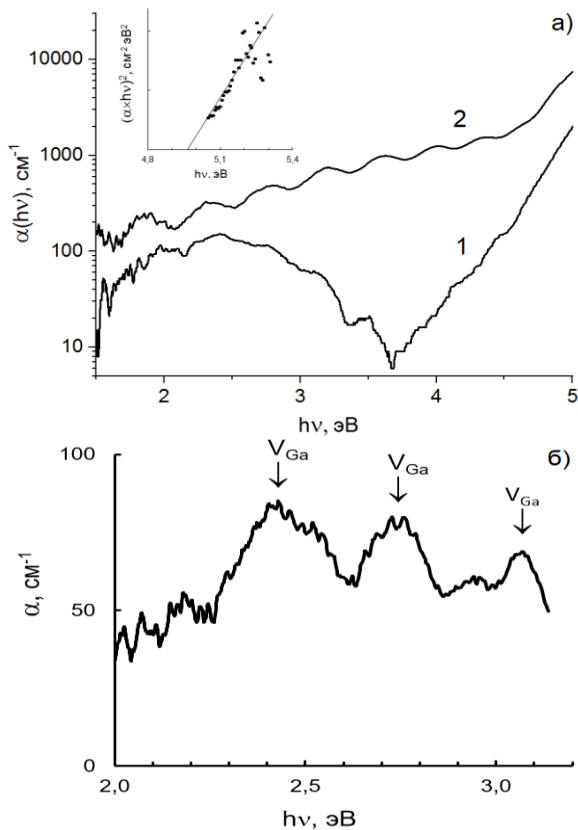


Рис. 3. а – спектральные зависимости коэффициента поглощения  $\alpha(h\nu)$  пленок оксида галлия до (1) и после (2) отжига. На вставке приведен спектр межзонного поглощения пленки до отжига в координатах, соответствующих прямым разрешенным переходам  $(\alpha \times h\nu)^2 - h\nu$ . Ширина запрещенной зоны соответствует точке пересечения линии тренда с осью энергии; б – спектры поглощения пленок  $\alpha(h\nu)$  до отжига в интервале энергий фотонов 2,0–3,2 эВ

Спектры  $\alpha(h\nu)$  осажденных пленок характеризуются выраженным краем фунда-

ментального поглощения при  $h\nu > 4.5$  эВ (рис. 3а) Ширина запрещенной зоны (ЗЗ) для прямых разрешенных переходов, рассчитанная при аппроксимации спектров в координатах  $(\alpha \times h\nu)^2 - h\nu$  (рис. 3, вставка), в осажденных пленках составляет  $E_g' = 4.97\text{--}5.05$  эВ, что характерно для  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Однако после отжига при  $900^\circ\text{C}$  на воздухе ширина ЗЗ сужается до  $E_g' = 4.77\text{--}4.79$  эВ. Энергия Урбаха для локализованных в ЗЗ состояний ростовых дефектов в интервале 4.0–5.0 эВ после отжига соответственно увеличивается от  $E_U = 0.2\text{--}0.25$  эВ до 0.3–0.35 эВ за счет усиления взаимодействия между дефектами при перекрытии их уровней. В спектрах  $\alpha(h\nu)$  осажденных пленок выделяется широкая полоса в интервале 1.6–3.1 эВ, обусловленная переходами с участием локальных уровней собственных дефектов акцепторного типа, наиболее вероятно, вакансий галлия  $V_{\text{Ga}}^{2+}$  с учетом идентификации (рис. 3а, кривая 1). Концентрация дефектов  $V_{\text{Ga}}^{2+}$ , оцененная для локальных полос с центрами при 2.42, 2.74 и 3.06 эВ (рис. 3б), значительна  $N \geq (0.5\text{--}1.0) \times 10^{18}\text{ см}^{-3}$ . Отжиг пленок при  $900^\circ\text{C}$  стимулирует преобразование локальных полос в непрерывное распределение уровней экспоненциального вида в интервале 1.4–4.6 эВ с энергией Урбаха  $E_U = 1.2\text{--}1.5$  эВ (рис. 3а, кривая 2). Подобное преобразование спектра уровней свидетельствует о формировании под влиянием отжига примесно-вакансионных комплексов.

Измерение поверхностной темновой  $\sigma_{\text{темн.}}$  и фотопроводимости  $\sigma_{\text{фото}}$  проводили на воздухе в двухэлектродной схеме с медными накладными электродами при расстоянии между электродами 0.2–0.3 см и при длине электродов 0.5 см. Для возбуждения фотопроводимости применяли излучение ртутной лампы с линиями при энергии фотонов 4.82, 3.91, 3.35, 3.09, 2.82, 2.25 и 2.13 эВ и с применением широкополосных интерференционных фильтров для выделения областей избирательной фоточувствительности материала пленок. Результаты представлены на рис. 4.

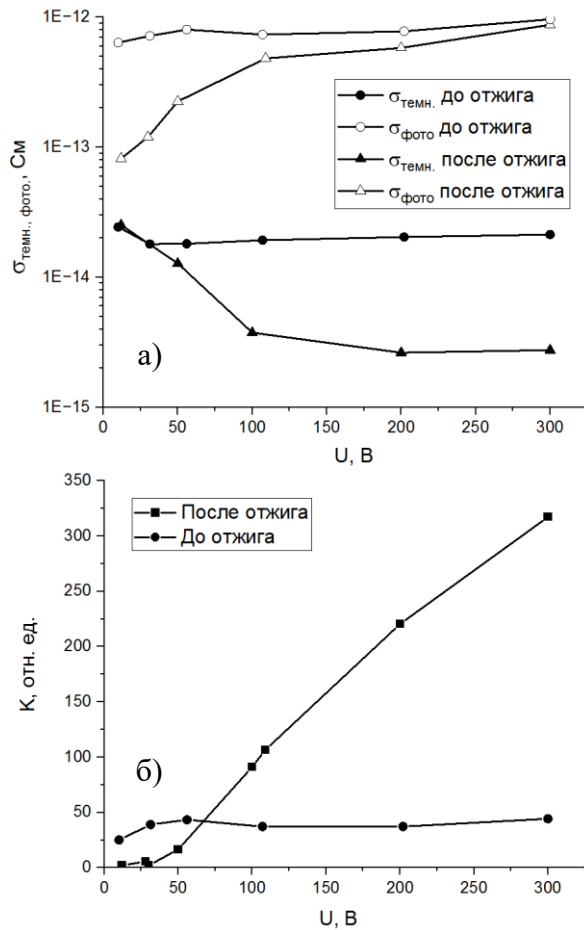


Рис. 4. а – зависимости поверхностной темновой  $\sigma_{\text{темн.}}$  и фотопроводимости  $\sigma_{\text{фото}}$  плёнок оксида галлия (до и после отжига) от напряжения на электродах; б – зависимость коэффициента фоточувствительности  $K$  плёнок до и после отжига

Осажденные пленки являются диэлектрическими с величинами темновой  $\sigma_{\text{темн.}} \approx 2 \times 10^{-14}$  См и фотопроводимости  $\sigma_{\text{фото}} = (6.5-9) \times 10^{-13}$  См и фоточувствительности  $K = (\sigma_{\text{фото}} - \sigma_{\text{темн.}}) / \sigma_{\text{темн.}} = 25-45$ . Отжиг вызывает снижение темновой и фотопроводимости проводимости до  $\sigma_{\text{темн.}} \approx (2-3) \times 10^{-15}$  См и  $\sigma_{\text{фото}} = (4-8.5) \times 10^{-13}$  См, повышению фоточувствительности до  $K = 100-300$  и появлению ее полевой зависимости  $K(U)$ .

Спектры фотолюминесценции характеризуются полосами с центрами при  $h\nu_0 = 1.67, 2.05, 2.5, 2.95$  и  $3.3$  эВ (рис. 5), которые характерны для пленок  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , полученных различными методами.

В докладе будут представлены результаты исследования закономерностей влия-

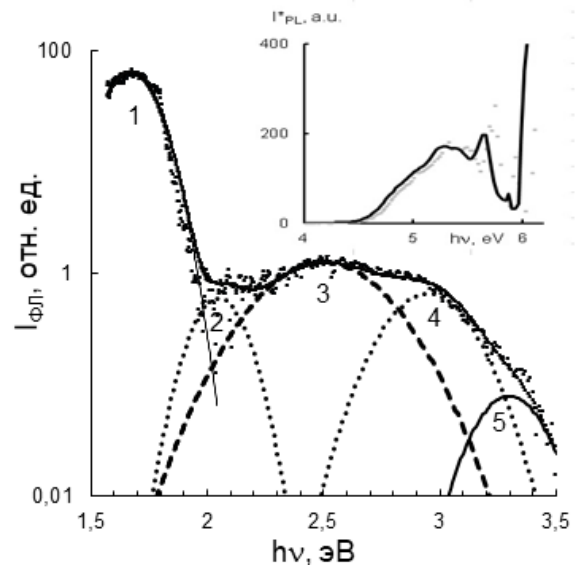


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции  $I_{\text{ФЛ}}(h\nu)$  плёнок оксида галлия после отжига. Энергия возбуждения  $h\nu = 4.96$  эВ. Параметры разложения:  $h\nu_{0i} = 1.67$  эВ,  $\gamma_i = 0.1$  эВ (1); 2.05 эВ, 0.1 эВ (2); 2.5 эВ, 0.23 эВ (3); 2.95 эВ, 0.16 эВ (4) и 3.3 эВ, 0.13 эВ (5). На вставке приведены спектры возбуждения фотолюминесценции  $I^*_{\text{ФЛ}}(h\nu)$  в полосе излучения при  $h\nu = 1.68$  эВ

ния короткоимпульсного ионного воздействия [2] на структуру, оптические и фотоэлектрические характеристики полученных плёнок. Облучение проводилось с использованием ускорителя ТЕМП-4М с диодом с магнитной самоизоляцией в режиме короткоимпульсной имплантации: ускоряющее напряжение  $U = 160-200$  В, длительность импульса – 90-100 нс, состав пучка – ионы углерода ( $> 85\%$ ) и протоны ( $< 15\%$ ), плотность тока на мишени – до  $15 \text{ A/cm}^2$ .

### Закключение

В работе исследованы тонкие плёнки оксида галлия, полученные методом высокочастотного магнетронного распыления. Показано влияние высокотемпературного отжига в среде воздуха на структуру, оптические и фотоэлектрические свойства плёнок. Получены зависимости темновой и фотопроводимости от напряжения, оценена фоточувствительность плёнок. В докладе будут представлены результаты влияния короткоимпульсного ионного воздействия на структуру, опти-

ческие и фотоэлектрические характеристики плёнок.

### **Благодарности**

Работа Ж.К. Койшыбаевой и А.Т. Акилбекова выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования республики Казахстан (ИРН AP14972907). Работа С.К. Павлова, Ф.В. Конусова и В.А. Тарбокова выполнена в рамках государственного задания FSWW-2023-0011. В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ

ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России No 075-15-2021-710.

### **Библиографические ссылки**

1. Кальгина В.М., Алмаев А.В., Новиков В.А., Петрова Ю.С. Солнечно-слепые детекторы УФ-излучения на основе плёнок  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Физика и техника полупроводников* 2020; (54): 575–579.
2. Remnev G., Tarbokov V., Pavlov S., Konusov F., Zenkin S., Musil, J. Irradiation of sputtered Al-Si-N coatings by pulsed 200 keV C<sup>+</sup> ion beam. *Vacuum* 2018; 158: 65-67.