

07.2

## Газочувствительные свойства пленок твердого раствора $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$

© В.И. Николаев<sup>1,2</sup>, А.В. Алмаев<sup>3,4</sup>, Б.О. Кушнарв<sup>3</sup>, А.И. Печников<sup>1,2</sup>, С.И. Степанов<sup>1,2</sup>,  
А.В. Чикиряка<sup>1</sup>, Р.Б. Тимашов<sup>1</sup>, М.П. Щеглов<sup>1</sup>, П.Н. Бутенко<sup>1,3</sup>, Е.В. Черников<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО „Совершенные кристаллы“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>4</sup> ООО „Фокон“, Калуга, Россия

E-mail: nkvlad@inbox.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 18 мая 2022 г.

Принято к публикации 6 июня 2022 г.

Исследовано влияние состава газовой среды на электропроводящие свойства пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$ , полученных методом хлоридной газофазной эпитаксии. В интервале температур 100–550°С пленки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  проявляют высокую чувствительность к  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$ , характеризуются высоким быстродействием и низким базовым сопротивлением. Предложен качественный механизм чувствительности пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  к газам.

**Ключевые слова:**  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$ , хлоридная газофазная эпитаксия, газовая чувствительность.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.14.52869.19211

Пленки полупроводниковых оксидов металлов широко применяются в газовых сенсорах [1,2]. Традиционно используются оксиды как *n*-типа проводимости ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ), так и *p*-типа ( $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ). Ранее мы сообщали о газовых сенсорах на основе  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  [3,4]. Оксид индия ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) также является перспективным материалом для газовых сенсоров с высокой чувствительностью к малым концентрациям  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$  [5,6].

Одним из методов повышения чувствительности и селективности полупроводниковых сенсоров газа является использование смесей и твердых растворов различных оксидов. Возможность варьирования электрофизических свойств полупроводника путем изменения состава открывает перспективы для разработки новых функциональных материалов для сенсорных систем [7]. Твердые растворы  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  представляют интерес для применения в газовых сенсорах ввиду возможности управления шириной запрещенной зоны, химическими и электрофизическими свойствами путем изменения компонентного состава.

В работе [8] было показано, что при прочих равных условиях нанопроволоки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  демонстрируют более высокие отклики на  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  и  $\text{NO}_2$ , чем нанопроволоки из чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$ . В работе [9] исследовались газочувствительные свойства оксидных композиций  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  с содержанием оксида галлия 1–8 wt.%. Сенсоры на основе  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  (1 wt.%  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) показывали больший отклик по сравнению с сенсорами на основе чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Авторы [10] исследовали газочувствительные свойства тонких пленок  $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{—In}_2\text{O}_3$ , полученных магнетронным распылением мишени из эвтектического сплава  $\text{Ga—In}$  (76%  $\text{Ga—24\% In}$ ). По сравнению с пленками на основе  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  пленки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$

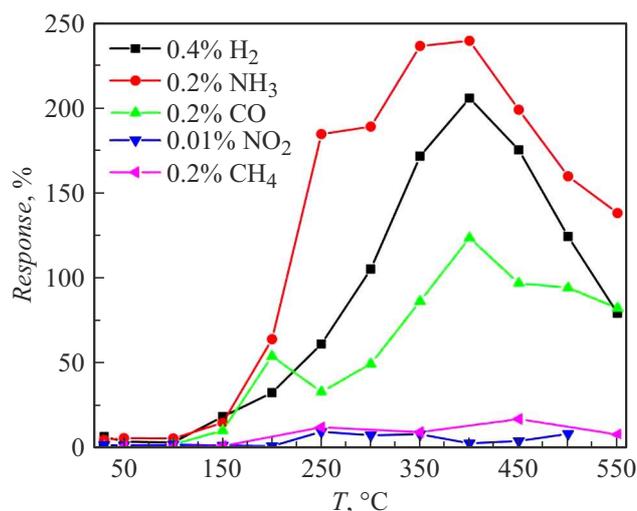
показывали схожие характеристики при воздействии  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  и  $\text{NH}_3$ , однако обладали более низкой рабочей температурой  $T$ . Также сообщалось, что сенсоры на основе пленок 50%  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—50\% Ga}_2\text{O}_3$  обладают высокой селективностью к  $\text{NH}_3$  [11]. Газовые сенсоры на основе пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  (96:4 wt.%) на стеклокерамических подложках показали высокую чувствительность к  $\text{C}_3\text{H}_8\text{—C}_4\text{H}_{10}$  и  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  при  $T = 250^\circ\text{C}$  [12].

В настоящей работе сообщается об исследовании чувствительности электросопротивления пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  к различным газам в интервале температур  $T = 30\text{—}550^\circ\text{C}$ .

Пленки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  толщиной 0.5  $\mu\text{m}$  были получены методом хлоридной эпитаксии (HVPE) на подложках сапфира [13,14]. В качестве прекурсоров использовались  $\text{InCl}_3$ ,  $\text{GaCl}$  и  $\text{O}_2$ . Температура роста пленок составляла 625°С. Номинальная концентрация  $\text{Ga}$  при данных условиях роста составляла около 10 at.%. Морфология поверхности пленок исследовалась при помощи сканирующей электронной микроскопии (SEM), химический и фазовый состав — с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDS) и рентгеновской дифракции (XRD) соответственно.

При анализе XRD-спектров пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  не удалось обнаружить пиков, которые можно ассоциировать с  $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ . Однако были получены рефлексы от плоскостей (222), (444), (004), (008) и (322), соответствующие кубическому *c*- $\text{In}_2\text{O}_3$ . Эта же особенность  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  отмечается в [15], где исследованы составы с большим содержанием  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ .

SEM-изображения показали, что полученные пленки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Ga}_2\text{O}_3$  имеют зернистую структуру с развитой поверхностью. Диаметр зерен  $D_g$  сопоставим с толщиной пленки. На поверхности пленок выделяются отдель-



**Рис. 1.** Температурные зависимости откликов пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  на различные концентрации  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{CH}_4$ .

ные кристаллиты с треугольной и квадратной огранкой, латеральным размером до  $1\ \mu\text{m}$  и высотой, соизмеримой с толщиной пленки. EDS-анализ показал наличие  $\text{In}$ ,  $\text{Ga}$  и  $\text{O}$  в концентрациях, близких к номинальным. Кроме того, EDS-спектры показали присутствие  $\text{Al}$ , что, по всей видимости, связано с алюминием, входящим в состав сапфировой подложки.

Подробно экспериментальные результаты, включающие XRD-дифрактограмму и SEM-изображение поверхности, представлены в более ранней работе [13], там же был проведен их анализ.

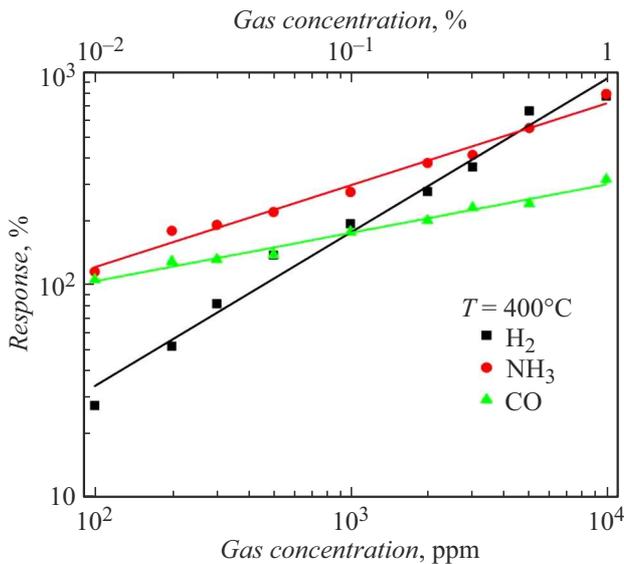
На поверхности пленок формировались  $\text{Pt}$ -контакты на расстоянии  $150\ \mu\text{m}$  друг от друга. Далее пластины разрезались на чипы размером  $1.2 \times 1.3\ \text{mm}$ . Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и временных зависимостей сопротивления образцов проводились в темновых условиях в атмосфере чистого воздуха или в газовой смеси чистый воздух—целевой газ. Исследовалась чувствительность пленок к  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Оборудование для исследования влияния газов на электропроводящие свойства пленок описано в работе [3].

Исследуемые структуры показывают чисто резистивное поведение, ВАХ образцов в интервалах напряжений  $U = 0\text{--}5\ \text{V}$  и температур  $T = 30\text{--}550^\circ\text{C}$  в атмосфере чистого воздуха являются линейными. Воздействие газов приводило к изменению наклона ВАХ без проявления каких-либо особенностей. Пленки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  характеризуются низким сопротивлением в чистом сухом воздухе  $R_{air}$ . Удельное сопротивление одного из образцов в чистом сухом воздухе при повышении  $T$  от  $30$  до  $300^\circ\text{C}$  снижается с  $2.80 \cdot 10^{-5}$  до  $1.02 \cdot 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{cm}$  и затем с дальнейшим повышением  $T$  до  $550^\circ\text{C}$  возрастает до  $1.31 \cdot 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{cm}$ . Воздействие восстановительных газов ( $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ ) приводило

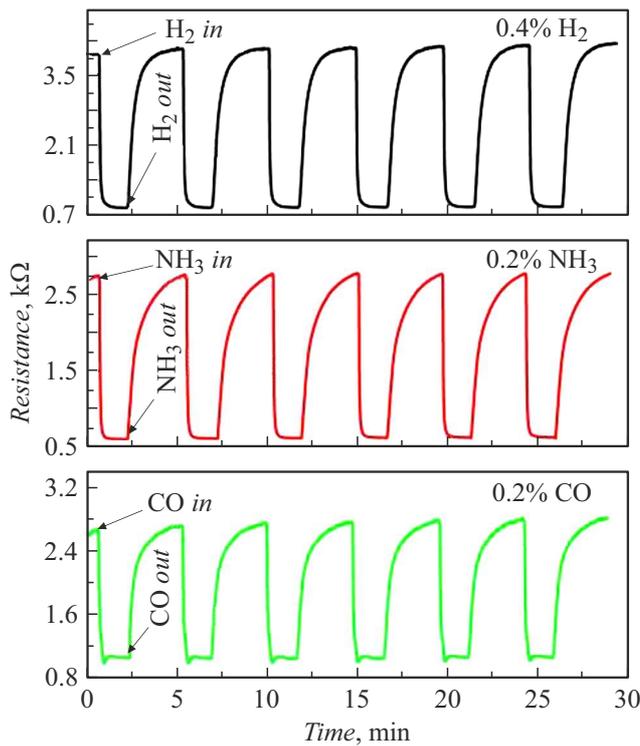
к обратимому уменьшению сопротивления  $R$  пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ . Напротив, воздействие окислительного газа ( $\text{NO}_2$ ) приводило к обратимому увеличению сопротивления  $R$ . В качестве отклика было выбрано отношение  $(\Delta R/R_g) \cdot 100\%$ , где  $\Delta R = |R_{air} - R_g|$ ,  $R_g$  — сопротивление пленки в газовой смеси чистого сухого воздуха и целевого газа. Значения  $R_{air}$  и  $R_g$  определялись по квазистационарным участкам временных зависимостей сопротивлений пленок в чистом сухом воздухе и в газовой смеси чистого сухого воздуха и целевого газа. Измерения отклика структур проводились при  $U = 2\ \text{V}$ .

При повышении  $T$  отклик сначала растет, достигая максимума при температуре  $T_{max}$ , а затем снижается (рис. 1). Значения  $T_{max}$  при воздействии  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$  составляли  $400^\circ\text{C}$ , а при воздействии  $\text{CH}_4$  и  $\text{NO}_2$  —  $450$  и  $250^\circ\text{C}$  соответственно. Наиболее высокие отклики наблюдались для  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$ , поэтому дальнейшие исследования газочувствительных свойств пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  проводились при воздействии именно этих газов. Зависимости откликов от концентраций газов описываются степенными законами и линеаризуются в двойных логарифмических координатах (рис. 2). Показатели степени при воздействии  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$  при  $T = 400^\circ\text{C}$  составляют  $0.72 \pm 0.03$ ,  $0.38 \pm 0.02$  и  $0.21 \pm 0.01$  соответственно. На рис. 3 показаны временные зависимости сопротивления пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  при  $T = 400^\circ\text{C}$  и циклическом шестикратном воздействии  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$ . Отклонения  $R_{air}$  и  $R_g$  от средних значений не превышали 1.5, 0.2 и 6% при воздействии  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$  соответственно. При длительных испытаниях, тех же значениях  $T$  и концентраций газов, когда образцы после проведения экспериментов хранились в герметичной упаковке, в течение двух недель с интервалом 1–2 дня наблюдались возрастания откликов в 1.7, 1.5 и 1.35 раза при воздействии  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$  соответственно, главным образом за счет снижения  $R_g$ . Наиболее значительные увеличения  $R_g$  и отклика имели место в первые пять суток испытаний. Время отклика  $t_{res}$  измерялось как временной интервал между началом воздействия на пленку соответствующей газовой смеси и моментом падения сопротивления до уровня  $1.1R_g$ . Время восстановления  $t_{rec}$  измерялось как временной интервал между началом продувки измерительной камеры чистым воздухом и подъемом сопротивления до уровня  $0.9R_{air}$ . В таблице представлены значения  $t_{res}$  и  $t_{rec}$  при  $T = 400^\circ\text{C}$  и фиксированных концентрациях газов. При воздействии  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$  пленки характеризуются короткими временами отклика  $t_{res}$  и длительными временами восстановления  $t_{rec}$ . Наиболее высокое быстрое действие наблюдалось при воздействии на пленки  $\text{H}_2$ . Следует отметить, что  $t_{res}$  и  $t_{rec}$  включают время, необходимое для установления стационарного состояния атмосферы в измерительной камере.

Участки спада и нарастания на временных зависимостях сопротивления (рис. 3) могут быть аппроксимированы двумя экспоненциальными членами с разными постоянными времени. Биэкспоненциальный характер



**Рис. 2.** Зависимости отклика пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  при  $T = 400^\circ\text{C}$  от концентраций  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}$ .



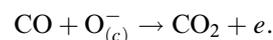
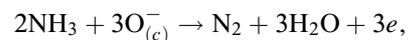
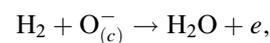
**Рис. 3.** Временные зависимости сопротивлений пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  при шестикратном воздействии  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ .  $T = 400^\circ\text{C}$ .

временных зависимостей сопротивления пленок свидетельствует о существовании двух процессов при адсорбции газовых молекул на поверхности  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ . Первый (быстрый) процесс обусловлен хемосорбцией газовых молекул на поверхности полупроводника, а второй, согласно работе [7], обусловлен взаимодей-

Времена отклика и восстановления пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  при воздействии  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$  ( $T = 400^\circ\text{C}$ )

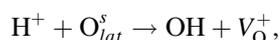
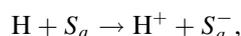
Время	Газ		
	$\text{H}_2$ (0.4%)	$\text{NH}_3$ (0.2%)	$\text{CO}$ (0.2%)
$t_{res}$ , s	21	15.5	17
$t_{rec}$ , s	58.8	90.0	90

ствием газовых молекул с кислородом кристаллической решетки в приповерхностной части полупроводника ( $\text{O}_{lat}^s$ ). При концентрации электронов в пленках  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3 \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [16] дебаевская длина значительно меньше  $D_g$ , что характерно для надбарьерного механизма проводимости носителей заряда. На границах зерен полупроводника существует потенциальный барьер  $e\phi_s$  для электронов, где  $e$  — заряд электрона,  $\phi_s$  — поверхностный потенциал. В атмосфере воздуха на поверхности полупроводников  $n$ -типа, к которым относится  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ , хемосорбируется кислород, захватывая электроны из зоны проводимости и формируя в приповерхностной части полупроводника область, обедненную электронами. Появление отрицательно заряженных ионов кислорода на поверхности  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  вызывает изгиб энергетических зон вверх, и  $e\phi_s \propto N_i^2$  [17,18]. При  $T \geq 150^\circ\text{C}$  на поверхности  $\text{In}_2\text{O}_3$  преобладает атомарная форма хемосорбированного кислорода  $\text{O}_{(c)}^-$  [19]. Резонно предположить, что это справедливо и для пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ . Сопротивление пленки  $R = R_0 \exp[e\phi_s/(kT)]$  [17,18], где  $R_0$  — параметр, определяемый геометрическими размерами пленки и зерен полупроводника, а также ее электрофизическими характеристиками, слабо зависящими от электрического состояния поверхности,  $k$  — постоянная Больцмана. Хемосорбция кислорода приводит к увеличению  $e\phi_s$  и  $R$ . Наличие потенциального барьера на границах зерен должно отражаться в нелинейности ВАХ, которая в нашем случае имеет место при  $U > 5 \text{ V}$ . В литературе [20,21] отмечается, что при  $U = 0\text{--}5 \text{ V}$  ВАХ для низкоомных пленок ИТО (indium tin oxide) и высокоомных пленок  $\text{SnO}_2$  являются линейными и симметричными при надбарьерном механизме проводимости. Мы полагаем, что при воздействии восстановительных газов на поверхности  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  происходят следующие реакции [17,18]:



В результате этих реакций уменьшаются  $N_i$ ,  $e\phi_s$  и  $R$ , в зону проводимости пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  поступают электроны, а продукты реакций десорбируются с поверхности в виде молекул  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ . В качестве

примера рассмотрим взаимодействие  $H_2$  с  $O_{lat}^s$ :



где  $S_a$  — свободный центр адсорбции, в качестве которого могут выступать сверхстехиометрические атомы металлов,  $S_a^-$  — центр адсорбции с локализованным на нем электроном,  $V_O^+$  — вакансия кислорода. В результате реакции с  $O_{lat}^s$  образуется нейтральная OH-группа, которая десорбируется с поверхности пленки, и повышается концентрация  $V_O^+$ , которые при диффузии в объем полупроводника являются донорами электронов, что вызывает снижение  $R$ . Отметим, что процессы, связанные с взаимодействием между газовыми молекулами и  $O_{lat}^s$ , с последующей диффузией  $V_O^+$  могут быть причинами значительных изменений  $R$  и отклика пленок при длительных испытаниях [22].

Ранее нами была исследована чувствительность к газам пленок  $\epsilon(\kappa)$ - $Ga_2O_3$  толщиной  $0.5 \mu m$ , полученных методом HVPE [3]. В сравнении с этими пленками  $In_2O_3$ - $Ga_2O_3$  характеризуется более высокими откликами на  $H_2$ ,  $NH_3$  и  $CO$ , которые регистрируются в более широком интервале температур (начиная с  $100^\circ C$ ). Кроме того, в отличие от других резистивных сенсоров на основе металлооксидных полупроводников пленки  $In_2O_3$ - $Ga_2O_3$  обладают низким базовым сопротивлением  $R_{air}$ , что является привлекательным для разработки дешевых и надежных систем съема и обработки информации с сенсоров на основе этого материала. Зачастую высокое базовое сопротивление металлооксидных сенсоров соответствует их высокой чувствительности к газам. Это не позволяет интегрировать высокоомные сенсоры с микроконтроллерами и другими элементами обработки информации, полученными по стандартным микроэлектронным CMOS- и MEMS-технологиям, главным образом из-за трудности измерения малых токов и/или обеспечения точности этих измерений [23–25].

Установлена высокая чувствительность электросопротивления пленок  $In_2O_3$ - $Ga_2O_3$ , полученных методом HVPE, к газам  $H_2$ ,  $NH_3$  и  $CO$  в широком интервале температур от  $100$  до  $550^\circ C$ . Максимальный отклик на эти газы наблюдается при температуре  $400^\circ C$ . Из всех изученных в работе газов наибольшее быстрое действие пленки демонстрируют при воздействии  $H_2$ . Сопротивления пленок  $In_2O_3$ - $Ga_2O_3$  в воздухе и при воздействии газов отличаются низким дрейфом при многократном воздействии газов. Предложен механизм газовой чувствительности пленок. Предполагается, что молекулы  $H_2$ ,  $NH_3$  и  $CO$  взаимодействуют не только с ранее хемосорбированным кислородом, но и с кислородом кристаллической решетки на поверхности полупроводника.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-79-10043).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M.V. Nikolic, V. Milovanovic, Z.Z. Vasiljevic, Z. Stamenkovic, *Sensors*, **20**, 6694 (2020). DOI: 10.3390/s20226694
- [2] N. Vorobyeva, M. Rumyantseva, V. Platonov, D. Filatova, A. Chizhov, A. Marikutsa, I. Bozhev, A. Gaskov, *Nanomaterials*, **11**, 2938 (2021). DOI: 10.3390/nano11112938
- [3] A. Almaev, V. Nikolaev, P. Butenko, S. Stepanov, A. Pechnikov, N. Yakovlev, I. Sinyugin, S. Shapenkov, M. Scheglov, *Phys. Status Solidi B*, **259**, 2100306 (2022). DOI: 10.1002/pssb.202100306
- [4] A.V. Almaev, E.V. Chernikov, V.V. Novikov, B.O. Kushnarev, N.N. Yakovlev, E.V. Chuprakov, V.L. Oleinik, A.D. Lozinskaya, D.S. Gogova, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **39**, 023405 (2021). DOI: 10.1116/6.0000723
- [5] G. Neri, A. Bonavita, G. Micali, G. Rizzo, E. Callone, G. Carturan, *Sensors Actuators B*, **132**, 224 (2008). DOI: 10.1016/j.snb.2008.01.030
- [6] H. Yamaura, K. Moriya, N. Miura, N. Yamazoe, *Sensors Actuators B*, **65**, 39 (2000). DOI: 10.1016/S0925-4005(99)00456-6
- [7] M.C. Carotta, A. Fioravanti, S. Gherardi, C. Malagú, M. Sacerdoti, G. Ghiotti, S. Morandi, *Sensors Actuators B*, **194**, 195 (2014). DOI: 10.1016/j.snb.2013.12.021
- [8] E. López-Aymerich, G. Doménech-Gil, M. Moreno, P. Pellegrino, A. Romano-Rodriguez, *Sensors*, **21**, 3342 (2021). DOI: 10.3390/s21103342
- [9] Ю.С. Гайдук, М.С. Охманюк, А.А. Савицкий, И.А. Таратын, *Вестн. БГУ. Сер. 2.*, № 3, 8 (2015). <https://elib.bsu.by/handle/123456789/158895>
- [10] A.G. Kozlov, O.V. Krivozubov, E.A. Kurdukova, M.N. Lila, in *2012 28th Int. Conf. on Microelectronics Proceedings (IEEE, 2012)*, p. 165. DOI: 10.1109/miel.2012.6222824
- [11] I.E. Demin, A.G. Kozlov, *AIP Conf. Proc.*, **2007**, 050004 (2018). DOI: 10.1063/1.5051948
- [12] M.S. Aleksanyan, V.M. Arakelyan, V.M. Aroutiounian, G.E. Shahnazaryan, *J. Contemp. Phys.*, **46**, 86 (2011). DOI: 10.3103/s1068337211020071
- [13] S. Stepanov, V. Nikolaev, A. Pechnikov, M. Scheglov, A. Chikiryaka, A. Chernykh, M. Odnobludov, V. Andreeva, A.Y. Polyakov, *Phys. Status Solidi A*, **218**, 2000442 (2021). DOI: 10.1002/pssa.202000442
- [14] В.И. Николаев, А.И. Печников, Л.И. Гузилова, А.В. Чикиряка, М.П. Щеглов, В.В. Николаев, С.И. Степанов, А.А. Васильев, И.В. Щемеров, А.Я. Поляков, *Письма в ЖТФ*, **46** (5), 27 (2020). DOI: 10.21883/PJTE.2020.05.49104.18107 [V.I. Nikolaev, A.I. Pechnikov, L.I. Guzilova, A.V. Chikiryaka, M.P. Shcheglov, V.V. Nikolaev, S.I. Stepanov, A.A. Vasil'ev, I.V. Shchemerov, A.Ya. Polyakov, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 228 (2020). DOI: 10.1134/S106378502003013X].

- [15] G. Korotcenkov, Iu. Boris, V. Brinzari, S.H. Han, B.K. Cho, Yu.N. Lychkovsky, *Ceram. Int.*, **41**, 7478 (2015). DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.02.069
- [16] A. Papadogianni, T. Nagata, O. Bierwagen, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, 045502 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/ac4ec7
- [17] N. Yamazoe, K. Shimanoe, *J. Sensors*, **2009**, 875704 (2009). DOI: 10.1155/2009/875704
- [18] В.И. Гаман, *Изв. вузов. Физика*, **51** (4), 84 (2008). [V.I. Gaman, *Russ. Phys. J.*, **51**, 425 (2008). DOI: 10.1007/s11182-008-9065-7].
- [19] M.N. Romyantseva, E.A. Makeeva, S.M. Badalyan, A.A. Zhukova, A.M. Gaskov, *Thin Solid Films*, **518**, 1283 (2009). DOI: 10.1016/j.tsf.2009.07.201
- [20] C.-W. Lin, H.-I. Chen, T.-Y. Chen, C.-C. Huang, C.-S. Hsu, R.-C. Liu, W.-C. Liu, *Sensors Actuators B*, **160**, 1481 (2011). DOI: 10.1016/j.snb.2011.07.041
- [21] В.В. Симаков, О.В. Якушева, А.И. Гребенников, В.В. Кисин, *Письма в ЖТФ*, **31** (8), 52 (2005). [V.V. Simakov, O.V. Yakusheva, A.I. Grebennikov, V.V. Kisin, *Tech. Phys. Lett.*, **31**, 339 (2005). DOI: 10.1134/1.1920390].
- [22] G. Korotcenkov, B.K. Cho, *Sensors Actuators B*, **156**, 527 (2011). DOI: 10.1016/j.snb.2011.02.024
- [23] J.L. Merino, S.A. Bota, R. Casanova, A. Dieguez, C. Cane, J. Samitier, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **53**, 1173 (2004). DOI: 10.1109/TIM.2004.831459
- [24] D. Barrettino, M. Graf, S. Taschini, S. Hafizovic, C. Hagleitner, A. Hierlemann, *IEEE Sensors J.*, **6**, 276 (2006). DOI: 10.1109/JSEN.2006.870156
- [25] A. Lombardi, M. Grassi, P. Malcovati, S. Capone, L. Francioso, P. Siciliano, A. Baschiroto, *Sensors Actuators B*, **142**, 82 (2009). DOI: 10.1016/j.snb.2009.07.030