

Электрофизические и газочувствительные свойства тонких плёнок $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$, полученных импульсным лазерным напылением

И. Е. Дёмин, А. Г. Козлов

Методом импульсного лазерного напыления получены поликристаллические тонкие полупроводниковые плёнки смешанного состава $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ с различным соотношением компонент. Исследованы морфология поверхности, электрофизические и газочувствительные свойства полученных плёнок. По температурным зависимостям сопротивления данных плёнок определены энергии активации их проводимости. Исследованы температурные зависимости отклика сопротивления плёнок на ацетон, этанол, аммиак и смесь пропан-бутан. Объяснено наличие на температурных зависимостях газового отклика сопротивления плёнок в диапазоне температур 300–500 °С участка со значениями меньше единицы в случае наличия в газовой фазе аммиака. По температурным зависимостям отклика сопротивления плёнок определены энергии активации отклика в низкотемпературной и высокотемпературной областях. Изучены зависимости отклика сопротивления плёнок от концентрации исследуемых газов. Установлено, что в качестве перспективного материала чувствительных слоев газовых сенсоров могут рассматриваться плёнки состава 50% $\text{In}_2\text{O}_3\text{--}50\%\text{Ga}_2\text{O}_3$.

Ключевые слова: полупроводниковые газовые датчики, оксиды переходных металлов, оксид галлия, оксид индия, тонкие плёнки.

Ссылка: Дёмин И. Е., Козлов А. Г. // Успехи прикладной физики. 2019. Т 7. № 3. С. 290.

Reference: I. E. Demin and A. G. Kozlov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (3), 290 (2019).

Введение

В газовом мониторинге широко используются резистивные полупроводниковые сенсоры, у которых в качестве материала чувствительного слоя применяются оксиды переходных металлов. Сенсоры на основе данных оксидов имеют низкую стоимость, достаточную временную стабильность, обеспечивают разнообразие детектируемых газов, способны работать в агрессивных средах [1–3]. Однако использование однокомпонентных

оксидов не позволяет одновременно удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к газовым сенсорам, таким как чувствительность, селективность, стабильность [1]. Перспективным подходом для улучшения данных параметров газовых сенсоров является применение многокомпонентных оксидных плёнок в качестве материалов чувствительных слоев газовых сенсоров [1, 4]. В настоящее время для этих целей исследован широкий спектр многокомпонентных плёнок на основе оксидов переходных металлов [1, 4, 5]. Это, в первую очередь, системы $\text{In}_2\text{O}_3\text{--SnO}_2$ (ITO), $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$ (IGZO), ZnO--SnO_2 , $\text{SnO}_2\text{--WO}_3$. Все они имеют определенные преимущества и недостатки и находят применение для детектирования различных газов. Тем не менее, интенсивные исследования многокомпонентных плёнок на основе оксидов переходных металлов продолжаются [5]. Среди

Дёмин Иван Евгеньевич, старший преподаватель.
Козлов Александр Геннадьевич, декан, д.т.н, доцент.
Омский Государственный Технический Университет.
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.
E-mail: IvanDemin3467@gmail.com; agk252@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2019 г.

© Дёмин И. Е., Козлов А. Г., 2019

них можно отметить многокомпонентные плёнки на основе оксидов индия и галлия [4, 6–8]. Имеются данные, показывающие перспективность применения плёнок $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ в качестве проводящих прозрачных покрытий [9]. Однако исследования по использованию данных многокомпонентных плёнок в качестве газочувствительных слоев сенсоров немногочисленны. В работе [6] исследованы газочувствительные свойства тонких плёнок, полученных магнетронным напылением из эвтектического сплава In--Ga с последующим отжигом в воздушной атмосфере. В [8] представлены результаты исследования агломеративных одноэлектродных газовых сенсоров с чувствительным покрытием $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$, нанесенным на платиновую спираль из золь $\text{In}(\text{OH})_3$ и $\text{Ga}(\text{OH})_3$. Приведенные в работах данные указывают только на потенциальную возможность применения оксидной системы $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ в качестве газочувствительного материала. На сегодняшний день информации об электрофизических и газочувствительных свойствах и методах получения плёнок системы $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ недостаточно, чтобы говорить о перспективности их использования в качестве газочувствительных слоев газовых микросенсоров.

Открытым вопросом при применении многокомпонентных плёнок в качестве чувствительных слоев остается выбор метода их получения. Для данной цели требуется использовать метод, дающий хороший контроль над параметрами получаемых плёнок и достаточную воспроизводимость этих параметров [1, 9]. Перечисленным требованиям удовлетворяет метод импульсного лазерного напыления (ИЛН). Важными достоинствами метода ИЛН являются стехиометрический перенос вещества от распыляемой мишени к подложке и малая скорость роста плёнки ($5\text{--}10$ нм мин^{-1}), что позволяет очень точно контролировать состав и толщину получаемых плёнок [10]. Несмотря на указанные достоинства, особенности применения метода ИЛН для получения многокомпонентных оксидных плёнок, используемых в качестве газочувствительных слоев, и свойства самих плёнок на примере хотя бы одной многокомпонентной системы практически не исследованы.

В связи с этим, целью данной работы является исследование электрофизических

свойств тонких плёнок системы $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$, полученных импульсным лазерным напылением, и влияния воздушной среды, содержащей горючие газы (этанол, ацетон, аммиак, смесь пропан-бутан), на сопротивление указанных плёнок.

Методика эксперимента

Многокомпонентные плёнки на основе оксидов галлия и индия были получены в два этапа. На первом этапе изготавливались мишени для напыления плёнок, на втором этапе проводилось импульсное лазерное напыление самих плёнок. Мишени получали прессованием смеси, состоящей из порошков Ga_2O_3 , In_2O_3 и водного раствора $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. После прессования мишени подвергались термообработке в среде воздуха при температуре 820 °С в течение 10 мин. Состав полученных мишеней определялся весовым соотношением компонентов в исходной смеси. Диаметр и толщина полученных мишеней составляли 12 мм и 5 мм соответственно. Галлий нитрат 8-водный добавлялся в смесь оксидов для увеличения прочности мишеней. В процессе термообработки галлий нитрат термически разлагался, образуя связи O--Ga--O между кристаллитами, которые обеспечивали механическую прочность мишени. Таким образом, было получено пять мишеней с составами $100\%\text{In}_2\text{O}_3$, $75\%\text{In}_2\text{O}_3\text{--}25\%\text{Ga}_2\text{O}_3$, $50\%\text{In}_2\text{O}_3\text{--}50\%\text{Ga}_2\text{O}_3$, $25\%\text{In}_2\text{O}_3\text{--}75\%\text{Ga}_2\text{O}_3$ и $100\%\text{Ga}_2\text{O}_3$.

Напыление многокомпонентных плёнок проводилось твердотельным импульсным лазером «Мелаз» в вакуумной камере с давлением остаточных паров воздуха 10^{-2} Па. Плёнки были получены при следующих режимах напыления: температура подложки $T_{\text{sub}} = 400$ °С; энергия лазерного пучка $E_{\text{emit}} = 50$ мДж; площадь фокального пятна $S = 7,85 \times 10^{-5}$ см^2 ; плотность энергии лазерного пучка $J_{\text{emit}} = 637,0$ Дж см^{-2} ; время напыления $t_{\text{dep}} = 20$ мин. В качестве подложек использовался ситалл СТ-50-1 толщиной 0,5 мм. Длина и ширина подложек составляла 10 и 5 мм соответственно. Плёнки напылялись на всю поверхность подложек. Толщина плёнок составляла 0,2 мкм. После напыления плёнки отжигались на воздухе при температуре 800 °С в течение 5 мин. для стабилизации их характеристик. Для каждой из пяти мишеней с составами $100\%\text{In}_2\text{O}_3$,

75%In₂O₃–25%Ga₂O₃, 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃, 25%In₂O₃–75%Ga₂O₃ и 100%Ga₂O₃ было получено по серии образцов для дальнейшего исследования.

Морфологические свойства плёнок исследовались на атомно-силовом микроскопе SolverPro. Исследование электрофизических и газочувствительных свойств плёнок проводилось в диапазоне температур 150–750 °С на специально разработанной установке, представленной на рис. 1. Установка содержала проволочный нагреватель, вмонтированный в плоское основание, на котором размещался исследуемый образец. Для измерения температуры образца использовалась хромель-копелевая термопара. При исследовании газочувствительных свойств плёнок данная установка помещалась в закрытую камеру, из которой откачивался газ до остаточного давления 10 Па. Затем камера наполнялась воздухом до атмосферного давления и в нее подавался исследуемый газ в необходимой концентрации.

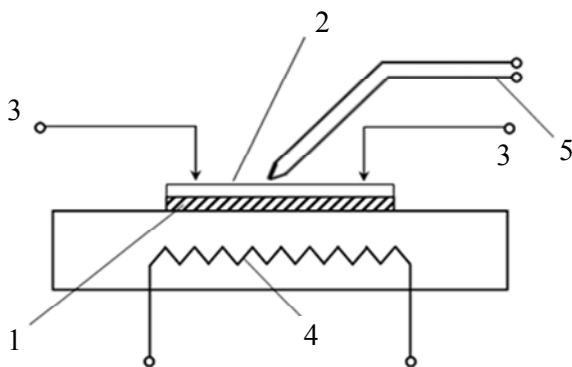


Рис. 1. Схема установки для измерения электрофизических характеристик плёнок In₂O₃–Ga₂O₃. 1 – подложка; 2 – исследуемый образец; 3 – прижимные контакты; 4 – проволочный нагреватель; 5 – термопара.

Газочувствительные свойства плёнок оценивались по изменению их сопротивления в атмосфере исследуемого газа. В качестве критерия использовался отклик сопротивления плёнок, S , равный

$$S = R_0 / R_g, \quad (1)$$

где R_0 и R_g – сопротивление плёнки в естественной воздушной атмосфере и в атмосфере исследуемого газа соответственно.

Результаты и обсуждение

При помощи атомно-силовой микроскопии получены изображения поверхности плёнок, напыленных из мишеней состава 100%In₂O₃, 75%In₂O₃–25%Ga₂O₃, 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃, 25%In₂O₃–75%Ga₂O₃, 100%Ga₂O₃. Данные о среднеквадратичном отклонении профиля поверхности (S_q) для плёнок приведены в табл. 1. Плёнки имеют поликристаллическую структуру с развитой поверхностью, состоящую из зёрен с размерами 90–300 нм. Наименьший средний размер зерен характерен для плёнок 100%In₂O₃. Данные плёнки имеют также наименьшее среднеквадратичное отклонение профиля поверхности. Наибольшие значения S_q , равные 228 нм и 240 нм, имеют плёнки с составом 75%In₂O₃–25%Ga₂O₃ и 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃ соответственно.

Таблица 1

Размер зёрен и среднеквадратичное отклонение профиля поверхности плёнок In₂O₃–Ga₂O₃

Состав плёнки	Средний размер зёрен, нм	S_q , нм
100%In ₂ O ₃	93	43
75%In ₂ O ₃ –25%Ga ₂ O ₃	269	228
50%In ₂ O ₃ –50%Ga ₂ O ₃	305	240
25%In ₂ O ₃ –75%Ga ₂ O ₃	266	154
100%Ga ₂ O ₃	231	138

Температурные зависимости сопротивления для всех плёнок представлены на рис. 2. Сопротивление плёнок состава 100%Ga₂O₃ в исследуемом температурном диапазоне 150–750 °С превысило 10 МОм, и они были исключены из дальнейшего рассмотрения. Для плёнок состава 25%In₂O₃–75%Ga₂O₃ представлен только участок температурной зависимости сопротивления, на котором их сопротивление меньше 10 МОм. На температурных зависимостях сопротивления исследуемых плёнок наблюдается участок с положительным температурным коэффициентом сопротивления в диапазоне температур 270–400 °С. Данное изменение сопротивления оксидов переходных металлов типично и объясняется изменением механизма адсорбции кислорода на их поверхности [11]. При указанных температурах происходит переход от преимущественной адсорбции молекулярного кислорода

O_2^- к преимущественной адсорбции атомарного кислорода O^- , O^{2-} , что приводит к увеличению сопротивления.

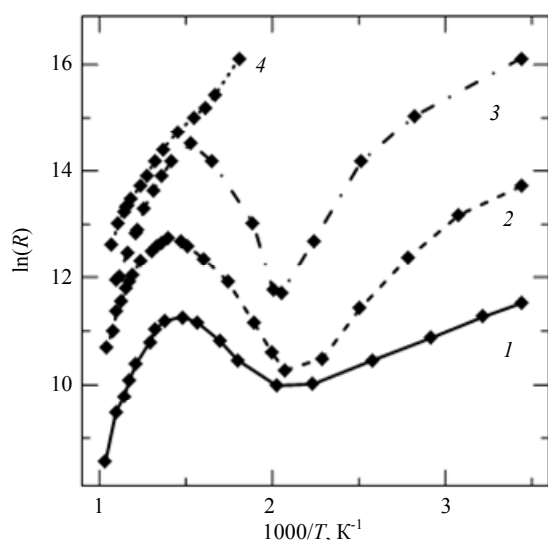


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления плёнок $In_2O_3-Ga_2O_3$ (логарифмический масштаб): 1 – 100% In_2O_3 ; 2 – 75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3 ; 3 – 50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3 ; 4 – 25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3 .

Минимальные и максимальные сопротивления и соответствующие им температуры для плёнок состава 100% In_2O_3 , 75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3 , 50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3 , 25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3 представлены в табл. 2. Сопротивление образцов возрастает при росте содержания оксида галлия. Таким образом, максимальное сопротивление среди рассматриваемых плёнок проявила плёнка, полученная из мишени с составом 25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3 , минимальное сопротивление – плёнка 100% In_2O_3 .

Используя температурную зависимость сопротивления плёнок, были определены значения энергии активации проводимости в различных температурных диапазонах, которые представлены в табл. 3. Результаты исследований показывают, что при увеличении содержания галлия энергия активации проводимости в диапазоне температур 75–200 °C возрастает. Энергия активации в диапазоне температур 450–600 °C примерно одинакова у всех образцов.

Таблица 2

Максимальные и минимальные значения сопротивления плёнок $In_2O_3-Ga_2O_3$ и соответствующие им значения температуры

Состав плёнки	R_{min} , кОм	R_{max} , кОм	$T(R_{min})$, °C	$T(R_{max})$, °C
100% In_2O_3	21,9	77,8	221	403
75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3	28,9	345	210	441
50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3	122	1998	214	381
25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3	–	9998	–	280

Таблица 3

Энергии активации проводимости плёнок $In_2O_3-Ga_2O_3$ в различных температурных диапазонах

Состав плёнки	Энергия активации проводимости, эВ	
	$T = 75-200$ °C	$T = 450-600$ °C
100% In_2O_3	0,126	0,631
75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3	0,256	0,662
50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3	0,328	0,665
25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3	–	0,646

Для плёнок состава 100% In_2O_3 , 75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3 , 50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3 , 25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3 исследованы температурные зависимости газового отклика сопротивления при концентрации исследуемых газов, равной 25 ppm. Время измерения составляло 10 мин. Погрешность измерения температуры не пре-

вышала 5%, сопротивления плёнок – 3%. Полученные результаты для плёнок состава 75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3 и 50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3 представлены на рис. 3.

Зависимости отклика плёнок от температуры в воздушных средах с рассматриваемыми горючими газами имеют максимум при опре-

деленной температуре. Амплитуда отклика всех плёнок на этанол и ацетон в диапазоне температур 500–600 °С превышает амплитуду их отклика на аммиак и смесь пропан-бутан в 2–4 раза.

Температурная зависимость отклика сопротивления для аммиака в температурном диапазоне 300–500 °С имеет область значений меньше единицы. Объяснить это можно тем, что в этом диапазоне температур на поверхности оксида переходного металла происходит реакция окисления аммиака с образованием оксидов азота [12]. При повышенных температурах молекулы оксидов азота являются более сильными

окислителями по сравнению с кислородом и либо замещают адсорбированный кислород на поверхности кристаллитов, либо адсорбируются на свободных центрах адсорбции [13]. В результате толщина обеднённого слоя на поверхности кристаллитов увеличивается, и, соответственно, сопротивление плёнок возрастает [13, 14].

Данные о максимуме амплитуды отклика всех образцов на различные газы, а также о температуре, при которой наблюдается максимум амплитуды отклика, представлены в табл. 4. Температура максимума отклика определена по аппроксимации экспериментальных данных функцией Гаусса.

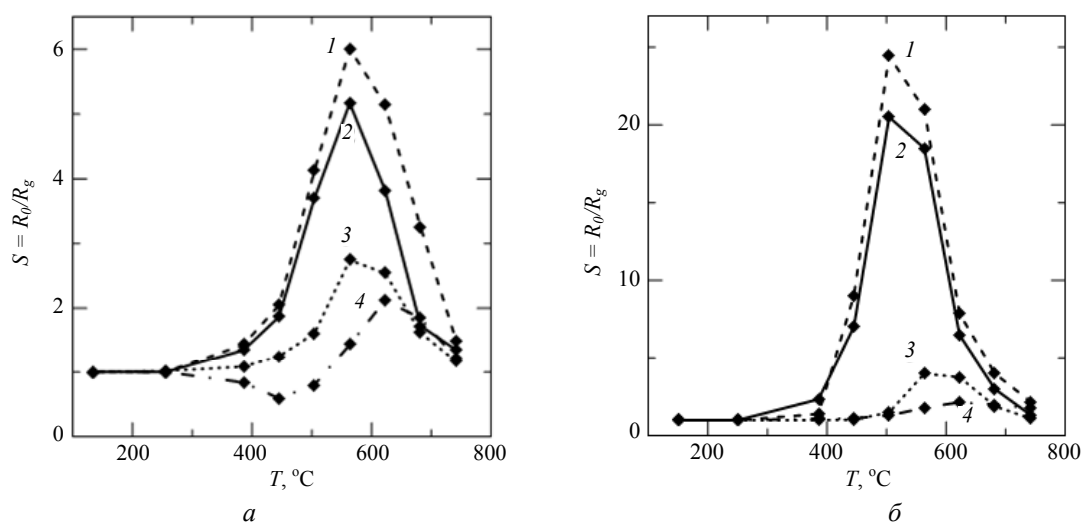


Рис. 3. Температурные зависимости отклика сопротивления плёнок на исследуемые газы $S = R_0/R_g$: а) – плёнка 75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3 ; б) – плёнка 50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3 . Кривая 1 – ацетон; 2 – этанол; 3 – смесь пропан-бутан; 4 – аммиак.

Таблица 4

Максимум амплитуды отклика сопротивления плёнок In_2O_3 – Ga_2O_3 на этанол, ацетон, аммиак и смесь пропан-бутан и температура максимума амплитуды отклика

Исследуемый газ	Состав плёнки	Температура максимума отклика сопротивления, °С	Максимальная амплитуда отклика сопротивления
Этанол	100% In_2O_3	561	2,5
	75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3	564	5,2
	50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3	530	18,5
	25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3	603	3,2
Ацетон	100% In_2O_3	566	2,8
	75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3	579	6,0
	50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3	528	21,0
	25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3	609	2,6
Аммиак	100% In_2O_3	638	1,4
	75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3	642	2,1
	50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3	649	2,2
	25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3	657	1,4
Пропан-Бутан	100% In_2O_3	595	1,7
	75% In_2O_3 –25% Ga_2O_3	589	2,7
	50% In_2O_3 –50% Ga_2O_3	594	4,0
	25% In_2O_3 –75% Ga_2O_3	633	1,93

Представленные данные показывают, что температура максимума отклика для разных плёнок отличается не более чем на 7%. Для плёнок с составом 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃ температура максимума отклика на этанол и ацетон немного ниже по сравнению с пленками других составов, при этом амплитуда отклика сопротивления на эти газы значительно больше.

Температурные зависимости отклика сопротивления плёнок на горючие газы (этанол, ацетон) в координатах $\ln(S) = f(1/kT)$ имеют два линейных участка (см. рис. 4 для случая ацетона). Углы наклона зависимостей на данных участках пропорциональны энергиям активации отклика сопротивления, ΔE . В табл. 5 представлены полученные значения ΔE для всех исследованных плёнок. Согласно работам [1, 15], основным фактором, влияющим на изменение отклика сопротивления плёнки в низкотемпературной области ΔE_{LT} , является разность энергий адсорбции горючего газа E_R и адсорбции кислорода E_O :

$$\Delta E_{LT} = E_R - E_O. \quad (2)$$

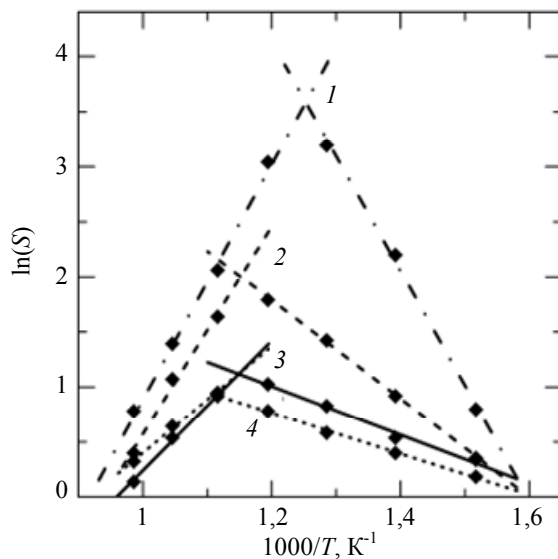


Рис. 4. Зависимость логарифма отклика сопротивления плёнок In₂O₃–Ga₂O₃ на ацетон от обратной температуры: 1 – 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃; 2 – 75%In₂O₃–25%Ga₂O₃; 3 – 100%In₂O₃; 4 – 25%In₂O₃–75%Ga₂O₃.

В высокотемпературной области энергия активации отклика сопротивления ΔE_{HT} определяется разностью энергий десорбции горючего газа q_R и десорбции продуктов его окисления q_{RO} [15]:

$$\Delta E_{HT} = q_R - q_{RO}. \quad (3)$$

Максимальная амплитуда отклика сопротивления наблюдается для плёнок состава 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃. Для плёнок состава 100%In₂O₃ и 25%In₂O₃–75%Ga₂O₃, как видно из представленных данных, амплитуды отклика сопротивления имеют минимальные значения.

Таблица 5

Эффективные энергии активации отклика сопротивления плёнок In₂O₃–Ga₂O₃ для низкотемпературного и высокотемпературного участков температурных зависимостей отклика сопротивления на ацетон

Состав плёнки	ΔE_{LT} , эВ	ΔE_{HT} , эВ
100%In ₂ O ₃	0,185	-0,508
75%In ₂ O ₃ –25%Ga ₂ O ₃	0,383	-0,815
50%In ₂ O ₃ –50%Ga ₂ O ₃	0,895	-0,926
25%In ₂ O ₃ –75%Ga ₂ O ₃	0,162	-0,417

В высокотемпературной области углы наклона линейных участков зависимостей 1 и 2 примерно равны. В соответствии с выражением (2), это указывает на то, что у плёнок 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃ и 75%In₂O₃–25%Ga₂O₃ разность энергий десорбции продуктов окисления горючего газа и десорбции самого горючего газа примерно одинакова. В низкотемпературной области у зависимостей 1 и 2 углы наклона линейных участков заметно различаются.

Можно предположить, что в композитном материале In₂O₃–Ga₂O₃ формируются центры, наличие которых приводит к уменьшению ΔE_{LT} в сравнении с чистыми оксидами галлия и индия. Возможные претенденты на роль таких центров: твёрдый раствор InGaO₃ [6], ромбоэдрический In₂O₃ в решётке кубического In₂O₃ [8] или область гетероконтакта между кристаллитами In₂O₃ и Ga₂O₃. Наиболее вероятным среди перечисленного является формирование твёрдого раствора InGaO₃, так как ранее в [6] с помощью рентгеноструктурного анализа было установлено, что формирование фазы InGaO₃ происходит для плёнок с составом, близким к 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃. Для таких плёнок в настоящей работе установлены высокое сопротивление (см. рис. 2) и наибольшая величина отклика сопротивления на горючие газы (рис. 3, б и табл. 4).

В дополнение к обсужденному выше, для всех образцов определены зависимости ам-

плитуды отклика сопротивления от концентрации исследуемого газа. Полученные результаты для плёнок состава 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃ представлены на рис. 5. Зависимости амплитуды отклика сопротивления для плёнок других составов имеют аналогичный вид.

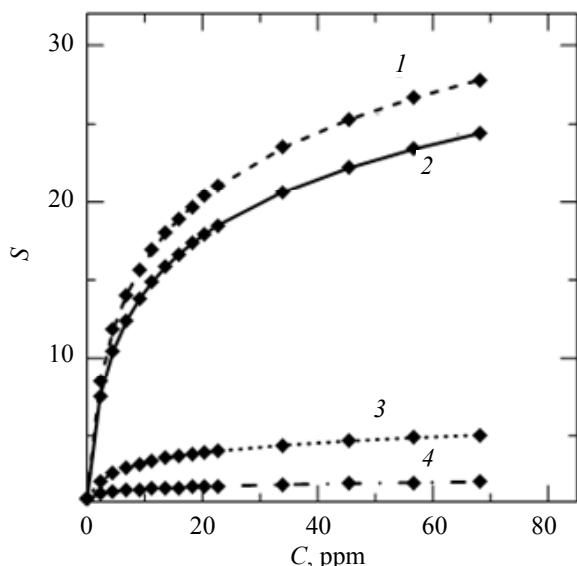


Рис. 5. Концентрационные зависимости амплитуды отклика S сопротивления плёнки 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃: 1 – ацетон; 2 – этанол; 3 – смесь пропан-бутан; 4 – аммиак (рабочая температура – 563 °С; время экспозиции – 10 мин).

Представленные экспериментальные данные могут быть аппроксимированы зависимостью

$$S = 1 + kC^n, \quad (4)$$

где C – концентрация анализируемого газа, k , n – константы, зависящие от механизма газовой чувствительности [16]. Для исследованных плёнок значение n лежит в интервале 0,49–0,55.

Заключение

Представленные результаты показывают, что плёнки, состоящие из оксидов индия и галлия, могут рассматриваться в качестве перспективных материалов для чувствительных слоев газовых сенсоров.

Получение данных плёнок методом импульсного лазерного напыления позволяет точно контролировать их состав и толщину.

Рассматриваемые плёнки имеют чувствительность к ряду горючих газов. Наибольшая чувствительность плёнок наблюдается к парам ацетона и этанола. Исследование зависимости свойств указанных плёнок от их состава показало, что наибольшую газовую чувствительность имеют плёнки состава 50%In₂O₃–50%Ga₂O₃. Кроме того, для данных плёнок температура максимума отклика сопротивления минимальна по сравнению с плёнками других составов. Причиной этого предлагается считать формирование фазы InGaO₃ в плёнке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korotcenkov G. Handbook of gas sensor materials. Properties, advantages and shortcomings for applications. Volume 1: Conventional approaches. – Berlin, Germany: Springer, 2013.
2. Barsan N., Koziej D., Weimar U. // Sens. Actuators B. 2007. Vol. 121. P. 18.
3. Гаман В. И., Севастьянов Е. Ю., Максимова Н. К., Сергейченко Н. С., Дробот А. В. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3. С. 44.
4. Eranna G., Joshi B. C., Runthala D. P., Gupta R. P. // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2004. Vol. 29. P. 111.
5. Capone S., Forleo A., Francioso L., Rella R., Siciliano P., Spadavecchia J., Presicce D. S., Taurino A. M. // J. Optoelectronics Adv. Mater. 2003. Vol. 5. No. 5. P. 1335.
6. Kozlov A. G., Krivozubov O. V., Kurdukova E. A., Lila M. N. / 28th International Conference on Microelectronics: proceedings (Nis, Serbia, 2012). P. 165–168.
7. Minami T. // Semiconductors and semimaterials. 2013. Vol. 88. P. 159.
8. Мычко Д. И., Лычковский Ю. Н., Каркоцкий Г. Ф., Боборико Н. Е. / Свиридовские чтения: сб. науч. трудов (Минск, 2008). Вып. 4. С. 20740.
9. Korotcenkov G. // Materials Science Engineering B. 2007. Vol. 139. P. 1.
10. Lowndes D. H., Geohegan D. B., Poretzky A. A., Norton D. P., Rouleau C. M. // Sci., New Series. 1996. Vol. 273. No. 5277. P. 898.
11. Кисин В. В., Сысоев В. В., Ворошилов С. А., Симаков В. В. // ФТП. 2000. Т. 4. № 34. С. 314.
12. Крылов О. В. Гетерогенный катализ. – М.: Академкнига, 2004.
13. Nisha R. // Energy and Environment Focus. 2013. Vol. 2. P. 157.
14. Steffes H., Imawan C., Solzbacher F., Obermeier E. // Sens. Actuators B. 2000. Vol. 68. P. 249.
15. Brynzari V., Korotchenkov G., Dmitriev S. // J. Electron. Technol. 2000. Vol. 33. P. 225.
16. Barsan N., Schweizer-Berberich M., Göpel W. // Fresenius J. Anal. Chem. 1999. Vol. 365. P. 287.

Electrophysical and gas-sensing properties of the $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films prepared by pulsed laser deposition

I. E. Demin and A. G. Kozlov

Omsk State Technical University
11 Mira ave., Omsk, 644050, Russia
E-mail: IvanDemin3467@gmail.com, agk252@mail.ru

Received February 26, 2019

Mixed oxide $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ polycrystalline thin films with various ratio of components were prepared by pulsed laser deposition. Investigations of surface morphology, electrophysical and gas sensing properties conducted. Energies of conductivity activation were calculated from temperature dependence of conductivity. Region of anomalous negative response was found on temperature dependence of gas response on ammonia for some films. Energies of adsorption/desorption activation were calculated from temperature dependence of gas response. Assumption of formation of some adsorption-promoting centers in $50\%\text{In}_2\text{O}_3\text{-}50\%\text{Ga}_2\text{O}_3$ films was made. $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ films were assumed to have perspectives of application as gas sensing material for semiconducting gas sensors.

Keywords: semiconductor gas sensors, transition metal oxides, gallium oxide, indium oxide, thin films.

REFERENCES

1. G. Korotcenkov, *Handbook of gas sensor materials. Properties, advantages and shortcomings for applications. Volume 1: Conventional approaches.* (Springer, Berlin-Germany, 2013).
2. N. Barsan, D. Koziej, and U. Weimar, *Sens. Actuators B.* **121**, 18 (2007).
3. V. I. Gaman, E. Yu Sevast'yanov, N. K. Maksimova, N. S. Segejchenko, and A. V. Drobot, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fiz.* **57**, 44 (2014).
4. G. Eranna, B. C. Joshi, D. P. Runthala, and R. P. Gupta, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* **29**, 111 (2004).
5. S. Capone, A. Forleo, L. Francioso, R. Rella, P. Siciliano, J. Spadavecchia, D. S. Presicce, and A. M. Taurino, *J. Optoelectronics Adv. Mater.* **5**, 1335 (2003).
6. A. G. Kozlov, O. V. Krivozubov, E. A. Kurdukova, and M. N. Lila, in *Proc. 28th International Conference on Microelectronics* (Nis, Serbia, 2012). pp. 165–168.
7. T. Minami, *Semiconductors and semimaterials* **88**, 159 (2013).
8. D. I. Mychko, Yu. N. Lychkovskij, G. F. Kar-kotskij, and N. E. Boboriko in *Proc. Sviridovskie chteniya* (Minsk, Russia, 2008), vol. 4. 20740 [in Russian].
9. G. Korotcenkov, *Materials Science Engineering B.* **139**, 1 (2007).
10. D. H. Lowndes, D. B. Geohegan, A. A. Poretzky, D. P. Norton, and C. M. Rouleau, *Sci., New Series* **273** (5277), 898 (1996).
11. V. V. Kisin, V. V. Sysoev, S. A. Voroshilov, and V. V. Simakov, *FTP* **34**, 314 (2000) [in Russian].
12. O. V. Krylov, *Geterogennyj kataliz.* (Akademkniga, Moscow, 2004) [in Russian].
13. R. Nisha, *Energy and Environment Focus.* **2**, 157 (2013).
14. H. Steffes, C. Imawan, F. Solzbacher, and E. Obermeier, *Sens. Actuators B.* **68**, 249 (2000).
15. V. Brynzari, G. Korotchenkov, and S. Dmitriev, *J. Electron. Technol.* **33**, 225 (2000).
16. N. Barsan, M. Schweizer-Berberich, and W. Göpel, *Fresenius J. Anal. Chem.* **365**, 287 (1999).