



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12229>

Нанокристаллические пленки на основе хромитов иттрия и лантана YCrO_3 и LaCrO_3 , допированных ионами стронция Sr^{2+} как основа полупроводниковых газовых сенсоров

М. А. Якимчук[✉], Е. С. Елисеева, В. Ф. Кострюков

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл. 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Легко получаемые наноструктурированные вещества представляют особый интерес для применения в качестве газочувствительных сенсоров. Поэтому одной из важнейших научных проблем является поиск новых составов и усовершенствование применяемых материалов. Целью данной работы было создание тонкопленочных материалов на основе нанопорошков хромитов иттрия и лантана YCrO_3 и LaCrO_3 , допированных ионами стронция, и выявление их газочувствительных свойств.

Синтез нанопорошков проводился золь-гель методом для LaCrO_3 и цитратным методом для YCrO_3 . Допированные порошки были получены теми же методами синтеза, что и исходные образцы. Был определен фазовый и элементный состав полученных образцов, по результатам которых выяснено, что реальный состав нанопорошков близок к номинальному. Проведены эксперименты по установлению газочувствительных свойств путем измерения удельного поверхностного сопротивления полученных образцов к содержанию угарного газа CO с концентрацией 50 ppm.

Установлено, что полученные образцы обладают *n*-типом проводимости и характеризуются откликом на присутствие угарного газа. Нанопленки на основе хромита иттрия обладают лучшим газочувствительным откликом, по сравнению с LaCrO_3 . Максимальным значением характеризуется $\text{Y}_{0,9}\text{Sr}_{0,1}\text{CrO}_3$, имеющий газочувствительный отклик 2.83 при температуре 200 °С.

Ключевые слова: полупроводники, газочувствительность, хромит иттрия, хромит лантана, допирование, нанопленки, нанопорошки

Благодарности: Результаты исследований получены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета.

Для цитирования: Якимчук М. А., Елисеева Е. С., Кострюков В. Ф. Нанокристаллические пленки на основе хромитов иттрия и лантана YCrO_3 и LaCrO_3 , допированных ионами стронция Sr^{2+} как основа полупроводниковых газовых сенсоров. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 536–546. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12229>

For citation: Yakimchuk M. A., Eliseeva E. S., Kostryukov V. F. Nanocrystalline films based on yttrium and lanthanum chromites YCrO_3 and doped with strontium ions Sr^{2+} as the basis of semiconductor gas sensors. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(3): 536–546. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12229>

✉ Якимчук Милена Алексеевна, e-mail: yakimchuk.720.46@gmail.com

© Якимчук М. А., Елисеева Е. С., Кострюков В. Ф., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Обеспечение безопасности на производстве является одной из главных проблем на сегодняшний день. Выделяющиеся ядовитые газы требуют незамедлительного детектирования для последующей своевременной ликвидации. В связи с этим используются газочувствительные датчики; реализуются поиски новых, современных составов материалов, которые позволяют детектировать малые концентрации газов за короткое время.

В настоящее время широко распространены газовые датчики на основе полупроводников *n*-типа. Наиболее значительный прогресс в этом направлении был достигнут при разработке газочувствительных транзисторов, устройств с барьером Шоттки и полупроводниковых газочувствительных резисторов. [1]. Сенсорным откликом обладают все полупроводники электронного типа проводимости, но распространены широкозонные полупроводники. К таким относятся SnO_2 , ZnO , In_2O_3 , WO_3 , характеризующиеся наиболее высокой газовой чувствительностью. Важными физико-химическими свойствами этих материалов являются электронный тип проводимости, прозрачность в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения и высокая реакционная способность поверхности [2–7].

Потребность в селективности детекторов приводит к поиску более сложных структурных соединений, одним из которых являются перовскит – орторомбическая структура пространственной группы *Pbmn* с общей формулой ABO_3 . Существует широкое разнообразие газосенсоров со структурой перовскита способных детектировать различные газы и легколетучие соединения.

Одним из распространенных материалов является композит оксида железа и оксида лантана типа перовскита LaFeO_3 . Он обладает как высокой ионной, так и электронной проводимостью при высоких температурах и пригоден для детектирования таких газов, как бутан, пропан, пропилен, бутилены, этилен, метан, формальдегид, углекислый газ CO_2 [8–10].

Помимо феррита лантана активно используется и его близкий аналог – кобальтит лантана, который проявляет удовлетворительные сенсорные свойства на такие газы-восстановители, как угарный газ и пары аммиака [11].

Альтернативными газовыми сенсорами со структурой перовскита являются хромиты переходных металлов. Основное их достоинст-

во – способность детектировать неорганические газы – оксид и диоксид углерода, оксид азота (II) [12, 13]. Детектирование газов происходит при несколько больших концентрациях газов, чем при использовании газового датчика на основе феррита лантана. Время отклика и время восстановления составляет до 3 минут, однако при большей концентрации исследуемого газа. Хромиты также являются перспективными благодаря низкой стоимости, селективности для конкретных газов и механической прочности, хотя рабочие температуры датчиков также остаются высокими [14–16]. Основным методом синтеза таких материалов остается, благодаря своей простоте и экономичности, золь-гель метод [17–19].

Дальнейшие разработки по газочувствительным датчикам на основе хромитов направлены на понижение рабочих температур и концентраций газов, необходимых для обнаружения. Целью данной работы было создание нанокристаллических пленок на основе нанопорошков хромитов иттрия и лантана, допированных ионами стронция, а также выявление их газочувствительных свойств на угарный газ в зависимости от содержания допанта.

2. Экспериментальная часть

Допированные нанопорошки хромита лантана были получены золь-гель методом. В работе применялась методика, используемая в нашей лаборатории для синтеза ферритов [20], и адаптированная для хромита лантана. В кипящую воду при постоянном перемешивании с помощью магнитной мешалки добавляли смесь растворов $\text{La}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, исходя из их стехиометрических соотношений для получения LaCrO_3 , $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{CrO}_3$ и $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_3$. Полученные растворы кипятили в течение 5 минут. Затем при перемешивании по каплям через делительную воронку добавили аммиачную воду, взятую в количестве достаточном для полного осаждения катионов, исходя из стехиометрического соотношения реагентов. Растворы перемешивали еще в течение 5 минут. Полученные осадки отделяли на вакуумном фильтре и высушивали в течение нескольких суток до постоянных масс при комнатной температуре. Конечные нанопорошки были получены путем термообработки обезвоженных осадков в муфельной печи (SNOL 8.2/1100) при температуре 950 °C в течение 1 часа.

Для получения хромита иттрия (с допантом и без) был использован цитратный метод. Ме-

тодика также была аналогична методике синтеза феррита иттрия [21] и адаптирована для хромита. В дистиллированной воде растворяли $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ и $Sr(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ в стехиометрическом соотношении. Растворы нагревали для лучшего растворения солей, а затем охлаждали. Далее при перемешивании по каплям добавляли рассчитанное количество аммиака до образования осадков. После добавления лимонной кислоты вновь нагревали до растворения осадка. Далее растворы полностью выпаривали и сжигали до образования пепла. Полученные порошки отжигали в муфельной печи (SNOL 8.2/1100) при температуре 950 °C в течение 1 часа.

Далее для исследования газочувствительных свойств на основе синтезированных порошков были изготовлены тонкие пленки. Для этого они были диспергированы в этиловом спирте с добавлением в качестве поверхностно-активного вещества бромида цетилтриметиламмония (ЦТАБ) до образования пасты. Затем методом *spin-coating* (установка SpinNXG-P1H) паста наносилась на токопроводящий элемент (кремниевую пластину). После чего, для удаления органического компонента, проводился отжиг в течение 1 часа при температуре 100 °C. Режим нанесения обеспечивал фиксированную толщину пленки 150 ± 5 % нм. Описанная методика является авторской разработкой.

Фазовый состав нанопорошков определяли на рентгеновском дифрактометре Thermo ARL X'TRA ($CuK\alpha$ излучение, $\lambda = 0.154$ нм), включающем компьютер, снабженный программным обеспечением для автоматической съемки и обработки дифрактограмм. Начальный угол съемки составляет $2\theta = 10^\circ$, конечный - $2\theta = 70^\circ$, шаг = 0.02. Расшифровка полученных дифрактограмм проводилась с помощью базы данных JCPDS PCPDFWIN [22]. Элементный состав полученных порошков в данной работе исследовали методом локального рентгеноспектрального микроанализа [23] на установке JEOL-6510LV с системой энергодисперсионного микроанализа Bruker. Удельное поверхностное сопротивление полученных тонких пленок исследовали методом Ван дер Пау на установке ЦИУС-4. Измерение удельного поверхностного сопротивления образцов, необходимого для установления газочувствительных свойств, осуществлялось на воздухе, а также в присутствии исследуемого газа (CO) с концентрацией 50 ppm. Методика была аналогичной описанной в [24]. Требуемая

концентрация угарного газа достигалась путем разбавления аттестованной газовой смеси сухим синтетическим воздухом. Измерения проводились в стационарной системе. Электрические контакты к тонким пленкам, расположенные по вершинам квадрата, состояли из карбида вольфрама с диаметром 0.5 мм. Расстояния между контактами составляли 1 мм. Нагревание производили со скоростью 1 °C/мин. В процессе эксперимента контроль температуры осуществлялся непрерывно. Для этого использовали термопару хромель-копель. Величину сенсорного сигнала определяли, как отношение удельного поверхностного сопротивления в воздухе к удельному поверхностному сопротивлению образцов в присутствии угарного газа [25]:

$$S_r = R_r / R_b,$$

где S_r – сенсорный сигнал, R_b – удельное поверхностное сопротивление пленок на воздухе, R_r – удельное поверхностное сопротивление пленок в присутствии газа-восстановителя.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Рентгенофазовый анализ (РФА)

Для подтверждения ожидаемого состава был определен фазовый состав нанопорошков методом рентгенофазового анализа (РФА). Полученные дифрактограммы представлены на рис. 1 и 2. По результатам рентгеновской дифрактометрии образец $LaCrO_3$, синтезированный золь-гель методом, состоял из одной фазы – орторомбического хромита лантана. Образец $YCrO_3$, полученный цитратным методом, имел одну фазу хромита иттрия. Примесных фаз не обнаружено.

Согласно данным РФА, образцы $La_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$, $La_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$, $Y_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$ и $Y_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$ характеризуются наличием единственной фазы – $YCrO_3$ и $LaCrO_3$ соответственно. Наблюдается сдвиг пиков по сравнению с исходными фазами и уменьшение межплоскостных расстояний элементарной ячейки, что говорит об успешном встраивании ионов стронция в кристаллические решетки хромита иттрия и хромита лантана. Увеличение сдвигов и уменьшение межплоскостных расстояний элементарных ячеек для допированных образцов хромита иттрия коррелирует с процентным содержанием ионов стронция.

Размер полученных частиц был определен по области когерентного рассеяния с помощью формулы Дебая–Шеррера и составил 25–27 нм для иттрий замещенных хромитов и 11–22 нм для лантан замещенных хромитов.

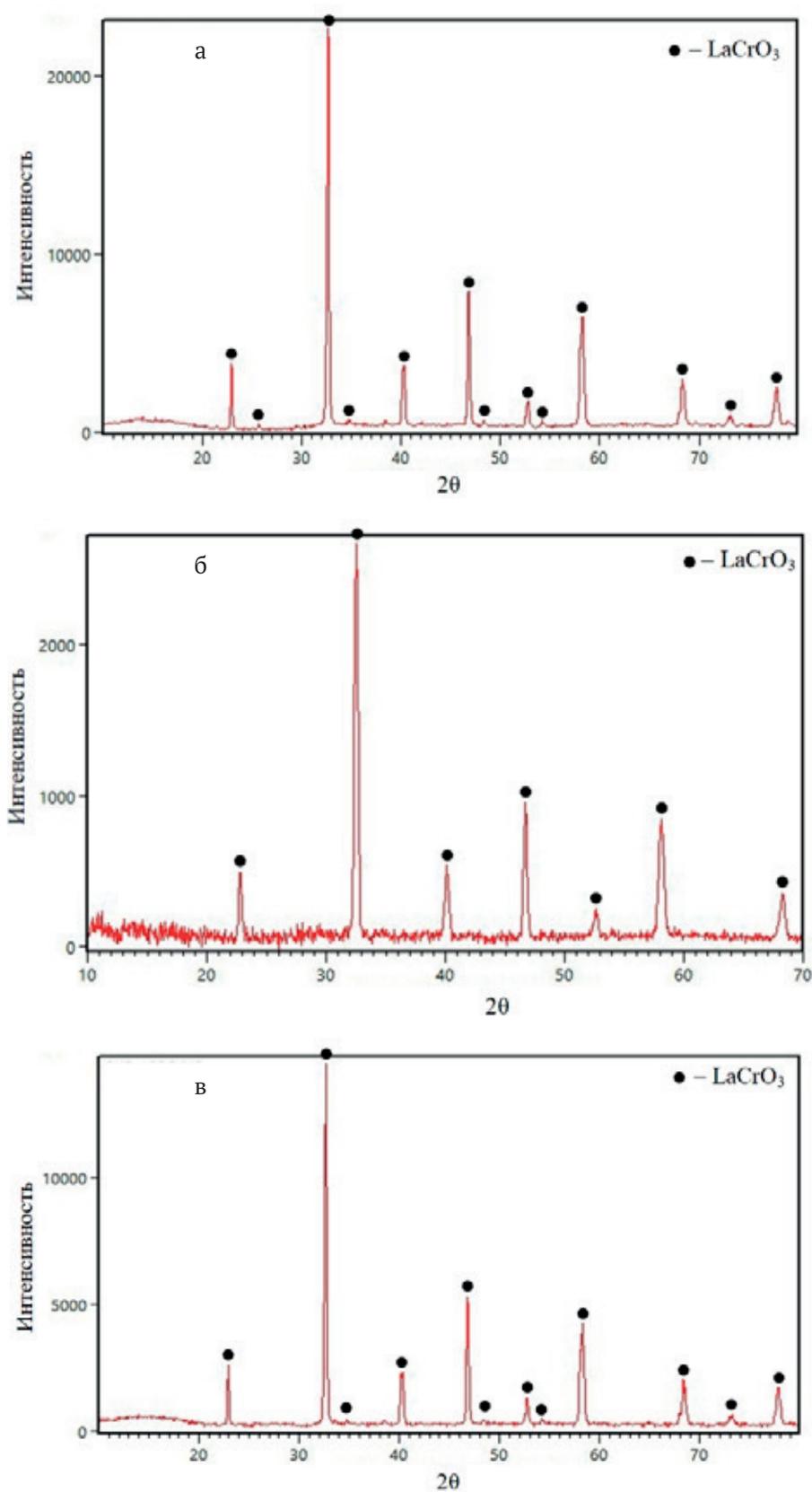


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы: а) LaCrO_3 ; б) $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{CrO}_3$; в) $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_3$

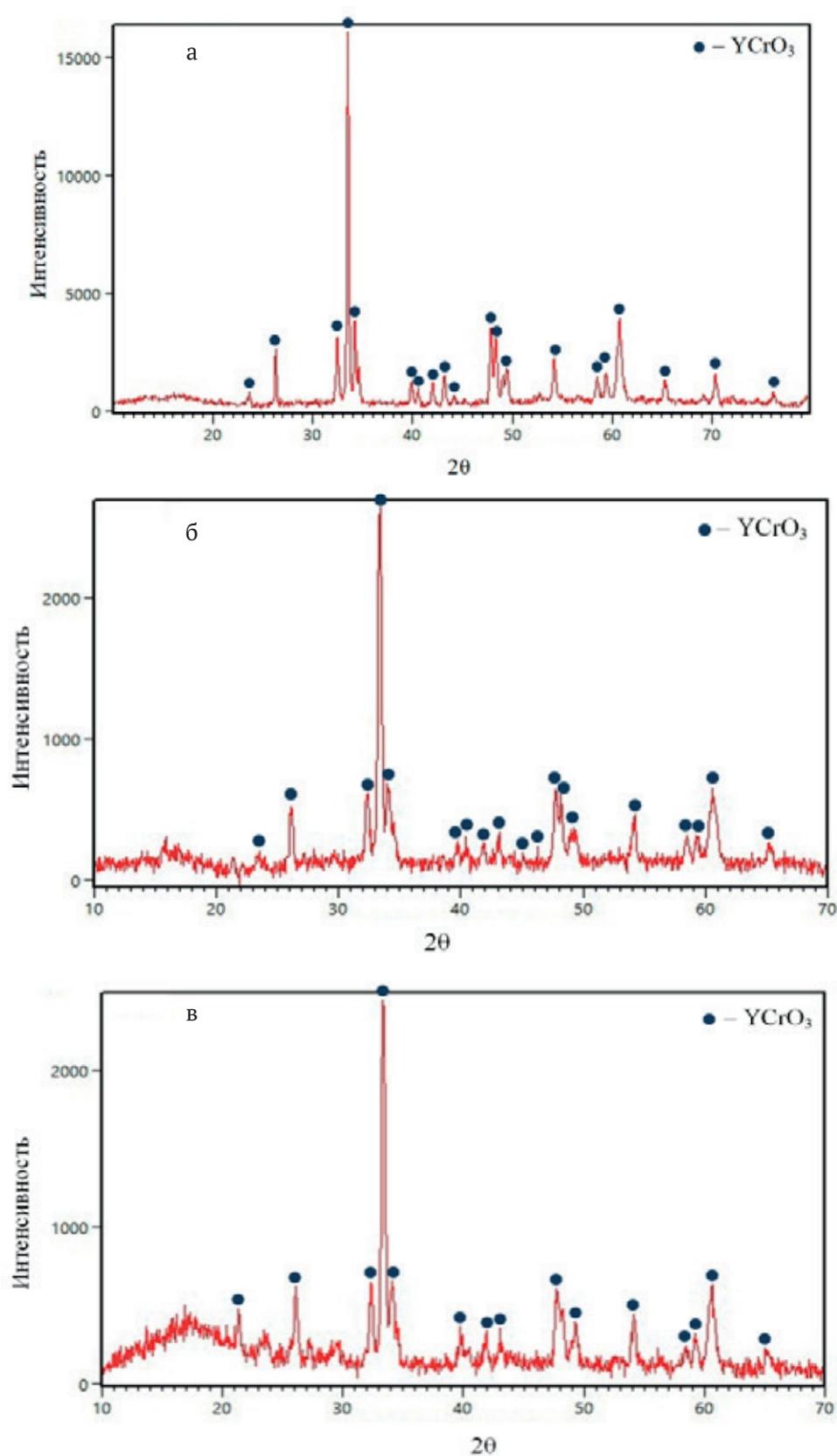


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы: а) $YCrO_3$; б) $Y_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$; в) $Y_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$

3.2. Локальный рентгеноспектральный микроанализ (ЛРСМА)

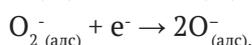
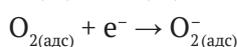
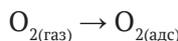
Элементный состав нанопорошков исследовали методом локального рентгеноспектрального микроанализа (ЛРСМА). Полученные результаты приведены в табл. 1 и 2. Данные ЛРСМА подтверждают включение стронция в решетку $LaCrO_3$ и $YCrO_3$. По результатам видно, что реальный состав наночастиц близок к их номинальному составу. Однако стоит отметить недостаток кислорода во всех образцах по сравнению с ожидаемым составом, что является следствием образования кислородных вакансий в процессе синтеза и должно благоприятно сказаться на газочувствительных свойствах, особенно для феррита иттрия.

3.3. Измерение удельного поверхностного сопротивления методом Ван дер Пау

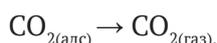
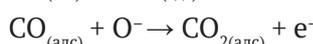
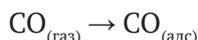
По результатам измерения удельного поверхностного сопротивления выявлено, что хромит иттрия реагирует на присутствие газа CO в концентрации 50 ppm, что представлено на рис. 3. По рис. 4 видно, что для образцов хромита лантана также наблюдается отклик, однако по сравнению с хромитом иттрия кривые сопротивления имеют более плавный характер.

Сопротивление тонких пленок хромитов иттрия при температуре от 20 до 200 °C и образцов хромита лантана от 20 до 180 °C при наличии угарного газа резко падает, что связано с взаимодействием адсорбированных молекул CO с адсорбированным на поверхности пленки кислородом воздуха. При этом протекают следующие взаимодействия:

с участием кислорода:



с участием детектируемого газа (CO):



Высвобождающиеся электроны являются электронами проводимости, повышение их концентрации и приводит к наблюдаемому понижению удельного поверхностного сопротивления. Что, в свою очередь, свидетельствует об электронном типе проводимости образцов, обусловленном, по всей видимости, вакансиями в анионной подрешетке, наличие которых следует из данных ЛРСМА.

На рис. 5 представлены графики зависимости газочувствительного отклика от температуры, которые свидетельствуют о восприимчивости датчиков на основе $YCrO_3$ и $LaCrO_3$ к исследуемому газу. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость сенсорного сигнала от степени допирования. С увеличением содержания стронция сенсорный сигнал возрастает.

При комнатной температуре чувствительность датчиков в присутствии угарного газа практически отсутствует. При увеличении температуры происходит адсорбция CO на поверхности образцов. Электроны переходят от адсорбированных молекул в приповерхностный слой,

Таблица 1. Результаты элементного анализа порошка $LaCrO_3$, $La_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$, $La_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$, синтезированного золь-гель методом

Номинальный состав наночастиц	Элементный состав, ат. %				Реальный состав образцов
	La	Sr	Cr	O	
$LaCrO_3$	19.41	0	20.28	60.31	$La_{0.96}CrO_{2.97}$
$La_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$	19.11	1.01	20.31	59.57	$La_{0.94}Sr_{0.05}CrO_{2.93}$
$La_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$	18.26	2.04	20.42	59.28	$La_{0.89}Sr_{0.1}CrO_{2.9}$

Таблица 2. Результаты элементного анализа порошка $YCrO_3$, $Y_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$, $Y_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$, полученного цитратным методом

Номинальный состав наночастиц	Элементный состав, ат. %				Реальный состав образцов
	Y	Sr	Cr	O	
$YCrO_3$	20.03	0	20.78	59.19	$Y_{0.96}CrO_{2.85}$
$Y_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$	19.84	0.98	20.74	58.44	$Y_{0.96}Sr_{0.047}CrO_{2.82}$
$Y_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$	19.53	1.97	20.66	57.84	$Y_{0.95}Sr_{0.095}CrO_{2.8}$

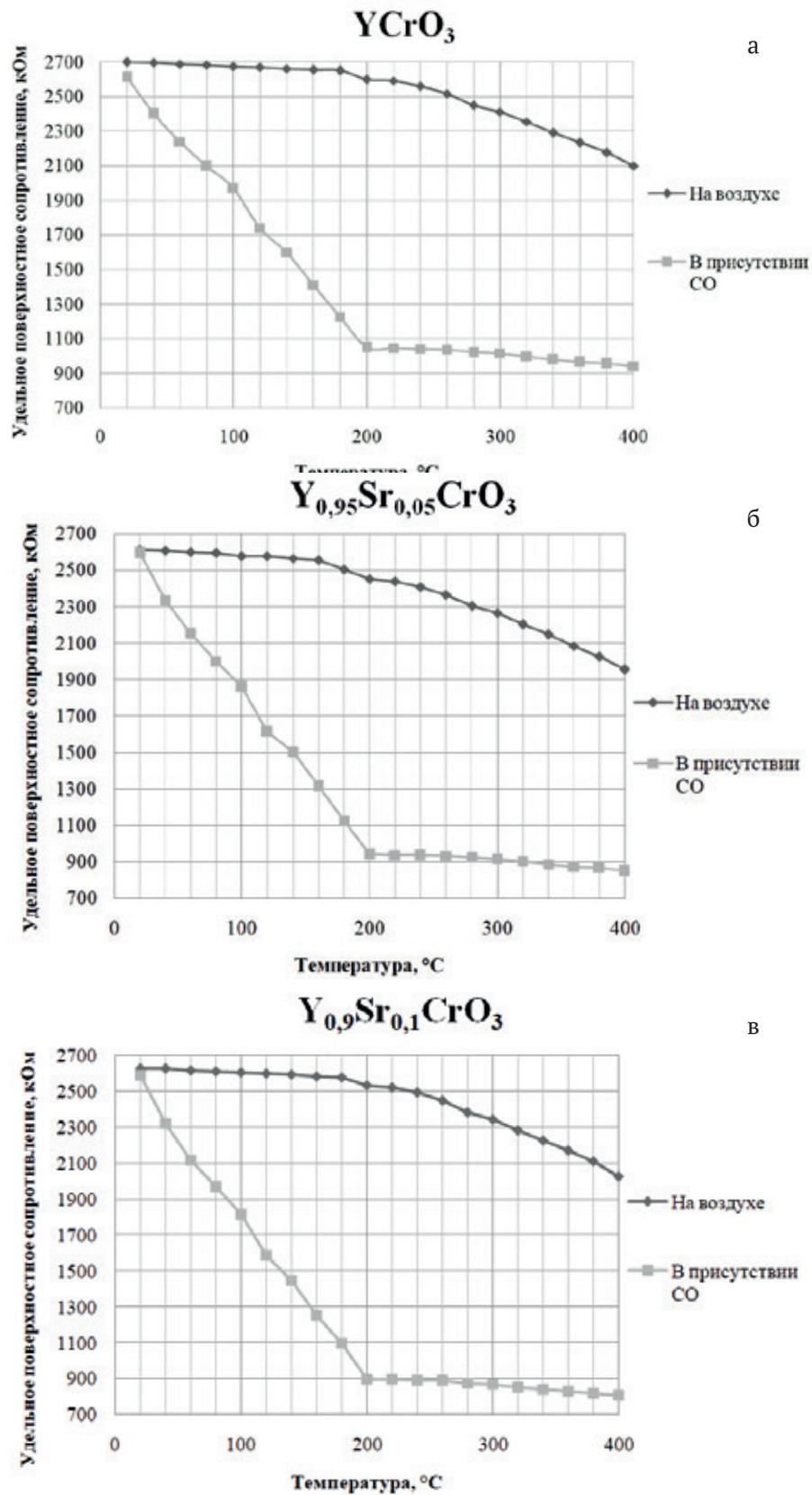


Рис. 3. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от температуры на воздухе и в присутствии CO для: а) $YCrO_3$; б) $Y_{0,95}Sr_{0,05}CrO_3$; в) $Y_{0,9}Sr_{0,1}CrO_3$

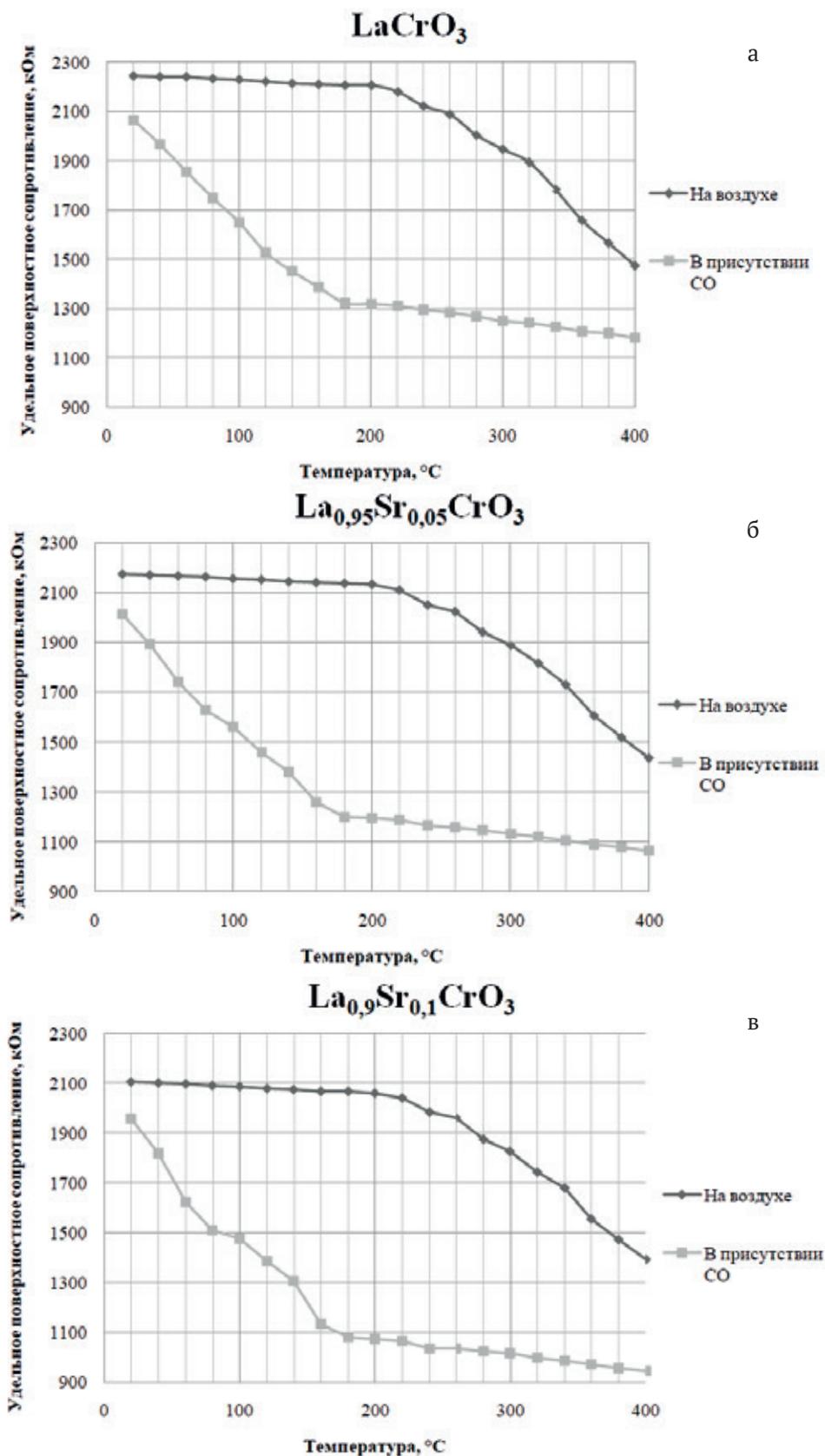


Рис. 4. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от температуры на воздухе и в присутствии CO для: а) $LaCrO_3$; б) $La_{0,95}Sr_{0,05}CrO_3$; в) $La_{0,9}Sr_{0,1}CrO_3$

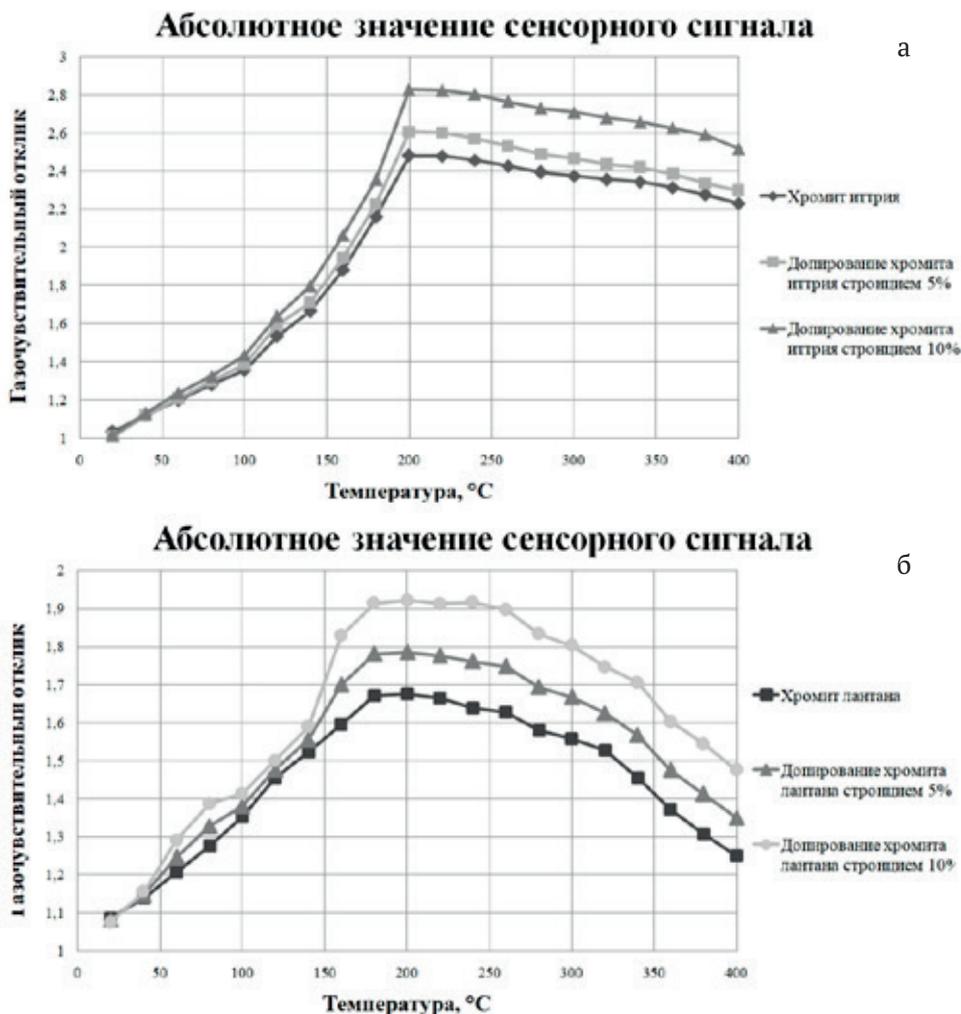


Рис. 5. Газочувствительный отклик в зависимости от температуры для: а) $YCrO_3$; б) $LaCrO_3$

в связи с чем уменьшается удельное поверхностное сопротивление наноматериалов. Максимальное значение сенсорного отклика газочувствительных тонких пленок достигается при температуре 200 °С для хромитов иттрия и достигает 2,82 для образца с максимальным содержанием допанта. Для хромитов же лантана ярко выраженный максимум отсутствует, и практически одинаковое значение сенсорного сигнала (1,92) сохраняется в интервале температур 180-240 °С, что особенно ярко выражено для образца с максимальным содержанием допанта. Образцы $YCrO_3$, $Y_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$, $Y_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$, $LaCrO_3$, $La_{0.95}Sr_{0.05}CrO_3$ и $La_{0.9}Sr_{0.1}CrO_3$ имеют тенденцию к линейному снижению сопротивления, что объясняется десорбцией молекул угарного газа с увеличением температуры, следовательно, разрывом связей между молекулами газа и поверхностными атомами образцов. При увеличении содержания стронция детектируются меньшие

значения сопротивления, а также увеличивается разница между сопротивлением в воздухе и в исследуемом газе.

Полученные значения сенсорного сигнала превосходят аналогичные результаты, известные из литературы, как для собственно хромита лантана [17], так и для аналогичного ему кобальтита лантана [11]. При этом необходимо отметить, что в сравнении с работой [17] такой результат достигнут одновременно со снижением концентрации детектируемого газа при сопоставимой температуре. В случае же кобальтита иттрия превосходящее значение сенсорного сигнала достигнуто при существенно большей температуре (200 °С вместо 100 °С).

4. Заключение

Золь-гель и цитратным методами были получены тонкие пленки на основе синтезированных нанопорошков $YCrO_3$ и $LaCrO_3$, а также до-

пированные Sr в количестве 5 и 10 ат. %. Синтезированные образцы являются однофазными и показывают хорошее соответствие реального и номинального составов. С помощью метода Ван дер Пау была задетектирована хорошая газовая чувствительность в присутствии угарного газа в концентрации 50 ppm. Установлена зависимость сенсорного сигнала от содержания допанта. Максимальное значение сенсорного сигнала 2,82 соответствует образцу $\text{Y}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_3$ при температуре 200 °C.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Ranga R., Kumar A., Kumari P., Singh P., Madaan V., Kumar K. Ferrite application as an electrochemical sensor: A review. *Materials Characterization*. 2021;178: 111269. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111269>
2. Uma S., Shobana M. K. Metal oxide semiconductor gas sensors in clinical diagnosis and environmental monitoring. *Sensors and Actuators: A. Physical*. 2023;349: 114044. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.114044>
3. Masuda Y. Recent advances in SnO_2 nanostructure based gas sensors. *Sensors and Actuators: B. Chemical*. 2022;1(2): 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131876>
4. Chen Y., Li H., Huang D., ... Han G. Highly sensitive and selective acetone gas sensors based on modified ZnO nanomaterials. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022;43(4): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.106807>
5. Petrov V. V., Bayan E. M. Investigation of rapid gas-sensitive properties degradation of ZnO-SnO_2 . *Chemosensors*. 2020;8: 1-13. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8020040>
6. Рябцев С. В., Обвинцева Н. Ю., Чистяков В. В., ... Домашевская Э. П. Особенности резистивного отклика на озон полупроводниковых сенсоров PdO, работающих в режиме термомодуляции. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(3): 392–397. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11263>
7. Румянцева М. Н., Иванов В. К., Шапорев А. С., ... Гаськов А. М. Микроструктура и сенсорные свойства нанокристаллического оксида индия, полученного с использованием гидротермальной обработки <https://elibrary.ru/item.asp?id=13615547>. *Журнал неорганической химии*. 2009;54(2): 195–203. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11685201>
8. Yadav A. K., Singh R. K., Singha P. Fabrication of lanthanum ferrite based liquefied petroleum gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016;229: 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.01.066>
9. Hu J., Chen X., Zhang Y. Batch fabrication of formaldehyde sensors based on LaFeO_3 thin film with ppb-level detection limit. *Sensors and Actuators: B. Chemical*. 2021;349: 130738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130738>
10. Qina J., Cui Z., Yanga X., Zhua S., Li Z., Lianga Y. Synthesis of three-dimensionally ordered macroporous LaFeO_3 with enhanced methanol gas sensing properties. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015;209: 706–713. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.12.046>
11. Чумакова В. Т., Марикуца А. В., Румянцева М. Н. Нанокристаллический кобальтит лантана как материал для газовых сенсоров. *Журнал прикладной химии*. 2021;94(12): 1390–1398. <https://doi.org/10.31857/S0044461821120057>
12. Tiwari S., Saleem M. Varshney M., Mishra A., Varshney D. Structural, optical and magnetic studies of YCrO_3 perovskites. *Physica B: Condensed Matter*. 2018;546: 67–72. <https://doi.org/10.1063/1.5122339>
13. Kadu A. V., Bodade A. B., Bodade A. B., Chaudhari G. N. Structural characterization of nanocrystalline $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_3$ thick films for H_2S gas sensors. *Journal of Sensor Technology*. 2012;2: 13–18. <https://doi.org/10.4236/jst.2012.21003>
14. Khetre S. M., Chopade A. U., Khilare C. J., Jadhav H. V., Jagadale P. N., Bamane S. R. Electrical and dielectric properties of nanocrystalline LaCrO_3 . *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2013;24: 4361–4366. <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1411-z>
15. Matulkova I., Holec P., Pacakova B., ... Vejpravova J. On preparation of nanocrystalline chromites by co-precipitation and autocombustion methods. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015;195: 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2015.01.011>
16. Rao V., Rajamani M., Ranjith R., David A., Prellier W. Local structural distortion and interrelated phonon mode studies in yttrium chromite. *Materials Research Society*. 2017;32(8): 1541–1547. <https://doi.org/10.1557/jmr.2017.5>
17. Prashant B. K., Kailas H. K., Uday G. D., Umesh J. T., Sachin G. S. Fabrication of thin film sensors by spin coating using sol-gel LaCrO_3 perovskite material modified with transition metals for sensing environmental pollutants, greenhouse gases and relative humidity. *Environmental Challenges*. 2021;3: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100043>

18. Chadli I., Omari M., Abu Dalo M., Albiss B. Preparation by sol-gel method and characterization of Zn-doped $LaCrO_3$ perovskite. *Journal of Sol-Gel Sci Technol.* 2016;80: 598–605. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-4170-5>
19. Zarrin N., Husain S., Khan W., Manzoor S. Sol-gel derived cobalt doped $LaCrO_3$: Structure and physical properties. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019;784(5): 541–555. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.018>
20. Nguyen A. T., Tran H. L. T., Nguyen Ph. U. T.,... Nguyen T. L. Sol-gel synthesis and the investigation of the properties of nanocrystalline holmium orthoferrite. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics.* 2020;11(6): 698–704. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2020-11-6-698-704>
21. Миттова И. Я., Перов Н. С., Алехина Ю. А.,... Сладкопевцев Б. В. Размер и магнитные характеристики нанокристаллов $YFeO_3$. *Неорганические материалы.* 2022;58(4): 283–289. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22030113>
22. JCPDC PCPDFWIN: A Windows Retrieval. Display program for Accessing the ICDD PDF. 2 Data base, Internation Centre for Diffraction Data. 1997.
23. Криштал М. М., Ясников И. С., Полуниин В. И., Филатов А. М., Ульяненьков А. Г. *Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ.* М.: Техносфера; 2009. 208 с.
24. Kostryukov V. F., Parshina A. S., Sladkopevtsev B. V., Mittova I. Ya. Thin films on the surface of GaAs, obtained by chemically stimulated thermal oxidation, as materials for gas sensors. *Coatings (MDPI).* 2022;12(12): 1819–1828. <https://doi.org/10.3390/coatings12121819>
25. Кострюков В. Ф., Балашева Д. С., Паршина А. С. Создание на поверхности InP тонких пленок с контролируемым значением газочувствительного сигнала под воздействием композиций $PbO + Y_2O_3$. *Конденсированные среды и межфазные границы.* 2021;23(3): 406–412. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3532>

Информация об авторах

Якимчук Милена Алексеевна, магистрант кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация). yakimchuk.720.46@gmail.com

Елисеева Евгения Сергеевна, студент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронежский государственный университет). eliseewa.zhenya@yandex.ru

Кострюков Виктор Федорович, д. х. н., доцент, доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронежский государственный университет).

<https://orcid.org/0000-0001-5753-5653>
vc@chem.vsu.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024; одобрена после рецензирования 02.08.2024; принята к публикации 15.07.2024; опубликована онлайн 01.10.2024.