



Оригинальные статьи

Научная статья  
УДК 537.226

Научная специальность ВАК – 1.4.15 Химия твердого тела  
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13591>

**Влияние ионов  $\text{Sr}^{2+}$  на газочувствительные свойства  $\text{LaCrO}_3$  и  $\text{GdCrO}_3$**

Я. М. Немых<sup>1</sup>✉, В. Ф. Кострюков<sup>1</sup>, И. Н. Горбунов<sup>1</sup>, Е. В. Томина<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»,  
ул. Тимирязева, 8, Воронеж 394087, Российская Федерация

**Аннотация**

*Цель статьи:* В работе исследованы тонкие пленки полученные из нанопорошков  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10$  и  $0.15$ ), синтезированных измененным цитратным методом.

*Экспериментальная часть:* Проведён анализ фазового состава пленок, структуры и газочувствительных свойств в присутствии угарного газа. Допирование ионами  $\text{Sr}^{2+}$  приводит к росту дефектности наночастиц, за счет образования вакансий в кислородной подрешетке. Данное явление благоприятно сказывается на их газочувствительных свойствах.

*Выводы:* Установлено, что образцы состава  $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$  и  $\text{Gd}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$  демонстрируют наибольший сенсорный отклик при 180 °С, 2.26 и 1.78 соответственно. Полученные результаты подтверждают перспективность использования этих материалов в качестве газовых сенсоров.

**Ключевые слова:** нанопорошки, перовскиты, газочувствительные свойства, метод Печини,  $\text{LaCrO}_3$ ,  $\text{GdCrO}_3$ , допирование  $\text{Sr}^{2+}$

**Благодарности:** Результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета: <http://ckp.vsu.ru>

**Для цитирования:** Немых Я. М., Кострюков В. Ф., Горбунов И. Н., Томина Е. В. Влияние ионов  $\text{Sr}^{2+}$  на газочувствительные свойства  $\text{LaCrO}_3$  и  $\text{GdCrO}_3$ . *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(1): 81–91. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13591>

**For citation:** Nemykh Y. M., Kostjukov V. F., Gorbunov I. N., Tomina E. V. Effect of  $\text{Sr}^{2+}$  ions on the gas-sensitive properties of  $\text{LaCrO}_3$  and  $\text{GdCrO}_3$ . *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(1): 81–91. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13591>

✉ Немых Яромир Максимович, e-mail: yaromir0202@gmail.com

© Немых Я. М., Кострюков В. Ф., Горбунов И. Н., Томина Е. В., 2026



## 1. Введение

С 1980-х годов активно изучаются газовые сенсоры на основе металлооксидов, например  $SnO_2$ , которые широко применяются в промышленности. Однако традиционные металлооксидные сенсоры не способны покрыть весь спектр задач современной промышленности, что стимулирует поиск новых материалов [2]. Одной из категорий таких материалов являются соединения со структурой перовскита. Газочувствительные материалы со структурой перовскита по сравнению с бинарными оксидами имеют несколько преимуществ: большие значения чувствительности, селективности, величины сенсорного сигнала. Синтез можно проводить при сравнительно низких температурах. Их газочувствительными свойствами можно достаточно легко и в широких пределах управлять, меняя как состав самого материала, так и природу и концентрацию допанта. При этом допирование может осуществляться в две позиции, а не в одну как у простых оксидов. Данная особенность перовскитоподобных соединений позволяет им содержать катионные и кислородные вакансии [3], наделяя данные соединения переменными электрическими и окислительно-восстановительными свойствами, которые оказывают решающее влияние на газочувствительные свойства [4]. Допирование позволяет изменять электрические и сенсорные характеристики материала, делая его более селективным.

Газовые сенсоры на основе перовскитов обеспечивают надёжное определение вредных газов в окружающей среде. Такие сенсоры могут работать в широком диапазоне температур и демонстрируют селективность к различным газам, таким как  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $NO_2$  и др. При этом максимальные величины сенсорного сигнала наблюдаются при более низких температурах. Снижение в сравнении с оксидами олова и цинка составляет до  $100^\circ C$ . Эти материалы перспективны для создания сенсоров с низким энергопотреблением. Основными механизмами чувствительности являются хемосорбция и каталитические процессы, протекающие на поверхности оксидных материалов [5, 6].

Существуют различные виды газовых сенсоров на основе перовскитоподобных материалов, такие как ферриты, кобальтиты, станниты, манганиты и прочие сложные оксиды.

Ферриты представляют собой оксидные соединения с общей формулой  $AFeO_3$ , где  $A$  – редкоземельный элемент. Они демонстрируют высо-

кую чувствительность к различным газам, особенно к углеводородам и  $CO$ . Среди ферритов наибольший интерес представляют  $LaFeO_3$  и  $YFeO_3$ , которые успешно применяются в детектировании сжиженных нефтяных газов [7].

Кобальтиты, такие как  $LaCoO_3$ , обладают высокой каталитической активностью и проявляют чувствительность к спиртам,  $CO$  и  $H_2$ . Допирование оксидами, такими как  $ZnO$ , улучшает их сенсорные характеристики, снижая рабочую температуру детектирования. Благодаря высокой термической устойчивости кобальтиты являются перспективными материалами для применения в газочувствительных сенсорах, работающих при повышенных температурах [8].

Станниты, представленные соединениями  $BaSnO_3$  и  $ZnSnO_3$ , проявляют чувствительность к  $NO_2$  и  $n$ -пропанолу. Они обладают хорошей селективностью и стабильностью, что делает их востребованными для мониторинга промышленных выбросов и качества воздуха в помещениях. Высокая рабочая температура сенсоров на основе станнитов (до  $900^\circ C$ ) ограничивает их применение, однако активные исследования направлены на снижение этих температур путём модификации структуры и морфологии материала [9, 10].

Манганиты, такие как  $YMnO_3$ , демонстрируют повышенную чувствительность к сероводороду ( $H_2S$ ) и аммиаку ( $NH_3$ ). Они обладают стабильной структурой и могут работать при относительно низких температурах (около  $100^\circ C$ ). Исследования показывают, что варьирование состава манганитов позволяет управлять их сенсорными характеристиками, что открывает перспективы их применения в экологическом мониторинге и промышленной безопасности [11].

Ещё одной перспективной группой материалов являются хромиты редкоземельных элементов, например,  $LaCrO_3$  [12] и  $GdCrO_3$ , исследуемые в нашей лаборатории [13]. Они демонстрируют устойчивость к высоким температурам, что делает их перспективными для сенсорных применений. Анализ литературы показывает, что допирование хромитов может изменять их электронные и поверхностные свойства. В работе [14] продемонстрирован широкий спектр возможностей модификации  $LaCrO_3$  для изменения его физических свойств, а в работе [15] авторы обнаружили, что механизм электропроводности  $GdCrO_3$  описывается моделью прыжковой проводимости Мотта с переменной длиной прыжка.

Таким образом, целью данной работы является исследование газочувствительных свойств хромитов лантана и гадолиния, допированных ионами  $\text{Sr}^{2+}$ . В работе проведён синтез и комплексный анализ состава, структуры и сенсорного отклика  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10, 0.15$ ) на наличие угарного газа в атмосфере. Выбор концентраций ионов стронция обусловлен, с одной стороны, необходимостью достаточно значительного воздействия на целевые характеристики, а, с другой стороны, необходимостью формирования однофазного материала.

## 2. Экспериментальная часть

Синтез нанопорошков  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10$  и  $0.15$ ) проводился модифицированным цитратным методом [16]. Данный метод основан на комплексообразовании катионов с лимонной кислотой с последующим термическим разложением. В качестве исходных веществ использовали нитраты лантана, гадолиния, стронция и хрома, лимонную кислоту и гидроксид аммония

Сначала рассчитанные количества нитратов  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (х.ч.) (или  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (х.ч.)),  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (х.ч.) и  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (ч.д.а.) растворяли в дистиллированной воде с постоянным перемешиванием. Полученный раствор прокипятили до образования золя, после чего по каплям приливали раствор аммиака до установления pH 7–8. В ходе осаждения образовывался гель. Полученный гель остудили до комнатной температуры, после чего, при постоянном перемешивании, в систему добавляли лимонную кислоту в стехиометрическом соотношении 3:1 по отношению к количеству катионов металлов.

Раствор подвергали нагреванию до полного испарения воды и образования гелеобразного осадка. Полученный гель прокалили при 300–350 °C для удаления органических соединений. Окончательное формирование нанопорошков достигалось термической обработкой в муфельной печи при 700 °C в течение 4 часов.

Полученные нанопорошки диспергировали в этиловом спирте с добавлением в качестве ПАВ бромида цетилтриметиламмония (ЦТАБ) до образования пасты, а затем методом spin-coating (установка SpinNXG-P1H) были нанесены на токопроводящий элемент (кремниевую пластину) и отожжены в течение 1 часа при температуре 100 °C. Режим нанесения (сначала 1 минута – 2000 об/мин, затем 20 минут – 5000 об/

мин) определялся по калибровочным зависимостям и обеспечивал фиксированную толщину  $150 \pm 7$  нм [17, 18].

## 3. Исследование состава и структуры

### Рентгенофазовый анализ

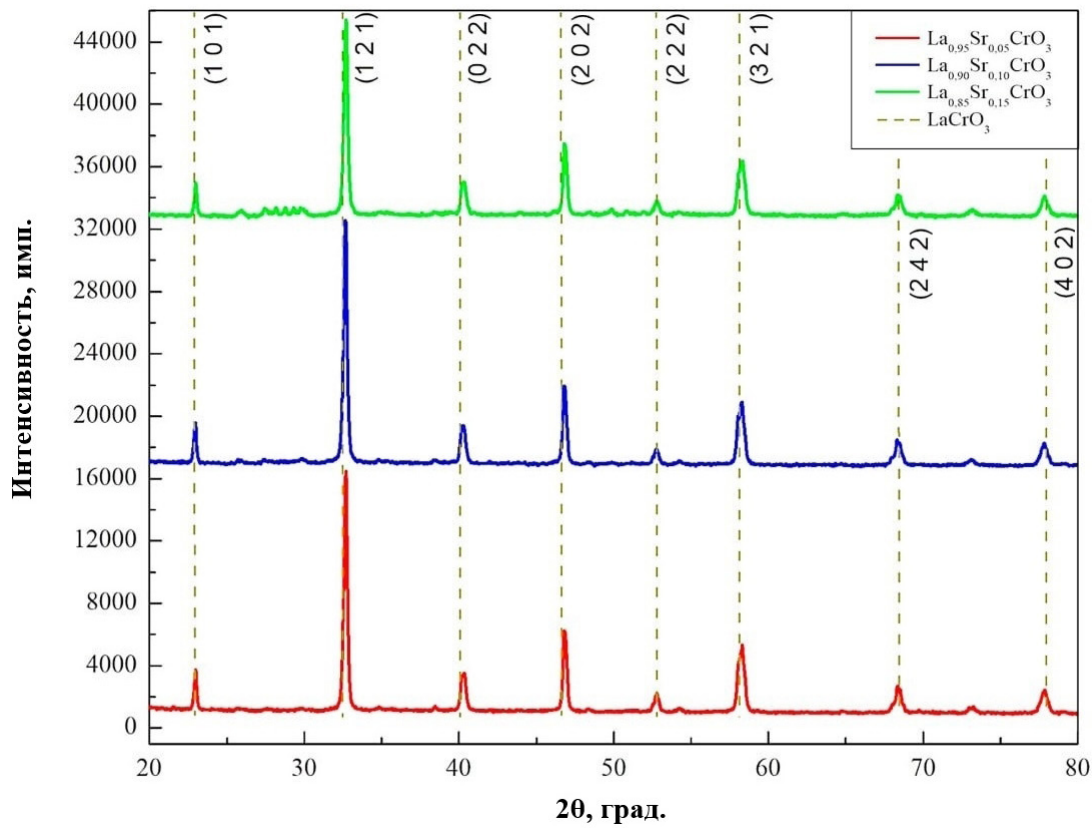
Фазовый состав серий образцов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10$  и  $0.15$ ) был выполнен на рентгеновском дифрактометре Thermo ARL X'TRA ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение,  $\lambda = 1.5418$  Å). При рассмотрении рентгеновских дифрактограмм полученных образцов (рис. 1) выявлено, что все пики на графиках зависимости интенсивности от угла  $2\theta$  соответствуют структуре перовскита, что подтверждается сравнением с базами рентгеновских дифрактограмм [19].

При подробном рассмотрении дифрактограмм наблюдается смещение пиков допированных образцов (табл. 1, 2) относительно недопированных, что указывает на изменение параметров решетки из-за встроившихся в нее ионов стронция.

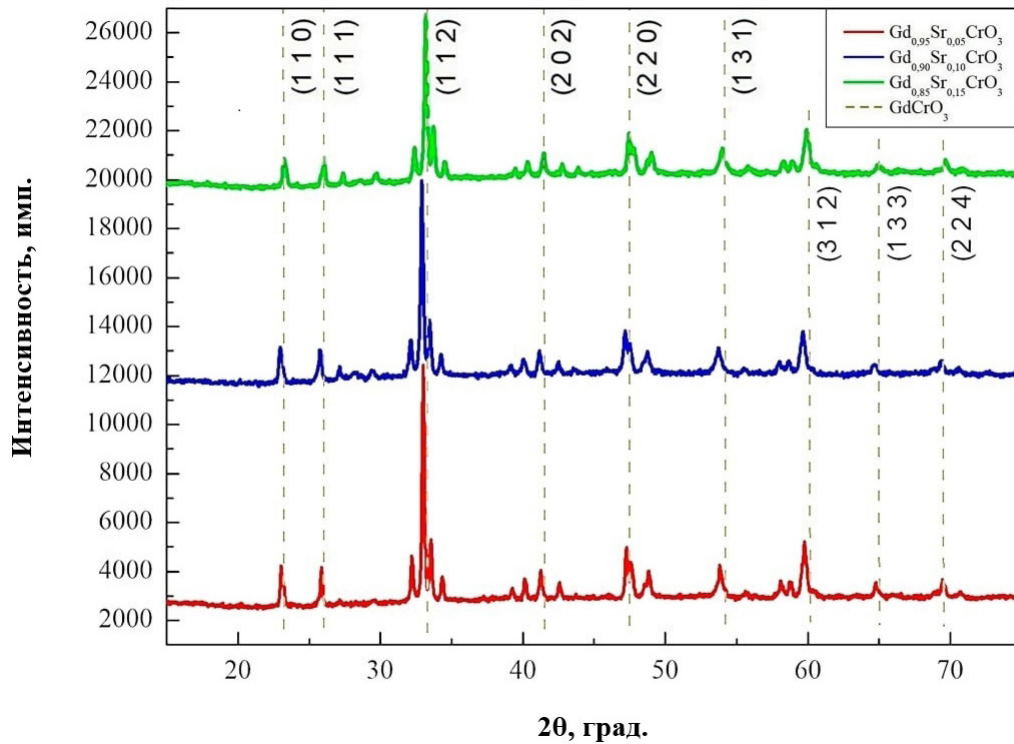
Смещение пиков допированного хромита лантана в большую сторону составило порядка 0.06, 0.03 и 0.04 град. для 5 ат. %, 10 ат. % и 15 ат. % стронция соответственно. Это объясняется тем, что ионный радиус Sr (1.16 Å) меньше ионного радиуса La (1.5 Å), что приводит к сжатию кристаллической решетки [20].

Смещение пиков допированного хромита гадолиния в меньшую сторону составило порядка 0.02, 0.03 и 0.03 град. для 5 ат. %, 10 ат. % и 15 ат. % стронция соответственно. Это объясняется тем, что ионный радиус Sr (1.16 Å), больше ионного радиуса Gd (0.98 Å), что приводит к увеличению межплоскостных расстояний [20].

На основании полученных данных был рассчитан объем элементарных ячеек синтезированных образцов при отсутствии и наличии допирования. Для незамещенного хромита лантана объем элементарной ячейки составил  $234.34$  (Å)<sup>3</sup>, а для хромита гадолиния  $222.95$  (Å)<sup>3</sup>. Табличные значения  $234, 46$  и  $223.71$  (Å)<sup>3</sup> соответственно (рассчитаны на основе данных [19]). Допирование ионами стронция приводит к изменению объема элементарной ячейки. Для допированного 10 ат. % Sr хромита лантана объем элементарной ячейки  $233.74$  (Å)<sup>3</sup>, а для допированного 10 ат. % Sr хромита гадолиния –  $223.57$  (Å)<sup>3</sup>. Полученные результаты, с одной стороны, находятся в хорошем соответствии с табличными значениями, а, с другой стороны, показывают закономерное изменения объема



а



б

**Рис. 1.** Сравнение рентгеновских дифрактограмм допированных нанопорошков La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CrO<sub>3-δ</sub> (а) и Gd<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CrO<sub>3-δ</sub> (б) с образцами без допирования

**Таблица 1.** Значение  $2\theta$  для серий образцов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10$  и  $0.15$ ) относительно незамещенного  $\text{LaCrO}_3$ 

Образец	Значение $2\theta$ для незамещенного образца / значение $2\theta$ для допированного образца							
	(101)	(121)	(022)	(202)	(222)	(321)	(242)	(402)
$\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{CrO}_{3-\delta}$	22.90 / 22.96	32.60 / 32.72	40.12 / 40.10	46.76 / 46.82	52.68 / 52.72	58.26 / 58.32	68.30 / 68.36	77.72 / 77.82
$\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$	22.90 / 22.92	32.60 / 32.64	40.12 / 40.14	46.76 / 46.80	52.68 / 52.72	58.26 / 58.28	68.30 / 68.32	77.72 / 77.76
$\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CrO}_{3-\delta}$	22.90 / 22.96	32.60 / 32.66	40.12 / 40.16	46.76 / 46.82	52.68 / 52.74	58.26 / 58.24	68.30 / 68.34	77.72 / 77.80

**Таблица 2.** Значение  $2\theta$  для серий образцов  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10$  и  $0.15$ ) относительно незамещенного  $\text{GdCrO}_3$ 

Образец	Значение $2\theta$ для незамещенного образца / значение $2\theta$ для допированного образца							
	(110)	(111)	(112)	(202)	(220)	(131)	(312)	(133)
$\text{Gd}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{CrO}_{3-\delta}$	23.24 / 23.26	26.04 / 26.02	33.20 / 33.16	41.46 / 41.42	47.46 / 47.44	54.00 / 53.98	59.92 / 59.92	64.98 / 64.96
$\text{Gd}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$	23.24 / 23.26	26.04 / 26.02	33.20 / 33.16	41.46 / 41.42	47.46 / 47.42	54.00 / 53.94	59.92 / 59.88	64.98 / 64.90
$\text{Gd}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CrO}_{3-\delta}$	23.24 / 23.26	26.04 / 26.02	33.20 / 33.16	41.46 / 41.42	47.46 / 47.42	54.00 / 53.96	59.92 / 59.88	64.98 / 64.92

элементарных ячеек при замене в процессе допирования исходных катионов на катион меньшего, в первом случае, и большего, во втором случае, радиуса.

### Локальный рентгеноспектральный микроанализ

Анализ элементного состава порошков был проведен на растровом электронном микроскопе JEOL-6510LV с системой энергодисперсион-

ного микроанализа Bruker. Результаты исследования представлены в табл. 3 и 4. Данный метод не способен оценивать содержание кислорода [21], поэтому в результатах анализа представлено только содержание катионов. Помимо непосредственно экспериментальных данных в табл. 3 и 4 добавлен столбец, показывающий соотношение в образцах катионов и характеризующий близость состава полученных образцов к заданному при синтезе.

**Таблица 3.** Результат анализа элементного состава нанопорошков недопированного хромита лантана и хромита лантана допированного стронцием

Номинальный состав образцов	Элементный состав, ат. %			
	La	Sr	Cr	$[\text{Sr}]/([\text{Sr}]+[\text{La}])$
$\text{LaCrO}_3$	19.4	–	20.6	–
$\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{CrO}_{3-\delta}$	19.54	0.99	20.61	0.48
$\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$	18.92	1.98	20.66	0.95
$\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CrO}_{3-\delta}$	18.03	3.02	20.73	0.14

**Таблица 4.** Результаты анализа элементного состава нанопорошков недопированного хромита гадолиния и хромита гадолиния допированного стронцием

Номинальный состав образцов	Элементный состав, ат. %			
	Gd	Sr	Cr	$[\text{Sr}]/([\text{Sr}]+[\text{Gd}])$
$\text{GdCrO}_3$	23.9	–	24.2	–
$\text{Gd}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{CrO}_{3-\delta}$	19.42	0.91	21.06	0.045
$\text{Gd}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$	19.03	1.86	21.03	0.089
$\text{Gd}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CrO}_{3-\delta}$	18.23	2.89	21.22	0.137

Обе серии образцов показали достаточно близкое соответствие к требуемому стехиометрическому соотношению. При этом, согласно результатам ЛРСМА, выявлено, что в системе  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10$  и  $0.15$ ) стронций вошел в большее количество, что связано с более простым замещением крупного иона  $\text{La}^{3+}$  (ионный радиус  $1.5 \text{ \AA}$ ) на ион  $\text{Sr}^{2+}$  (ионный радиус  $1.04 \text{ \AA}$ ) меньшего размера. В систему  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0.05, 0.10$  и  $0.15$ ) стронций вошел в меньшем количестве, так как ионный радиус  $\text{Gd}$   $0.96 \text{ \AA}$  [20].

При этом, несмотря на то, что содержание кислорода экспериментально не установлено, можно предположить, что в синтезированных образцах будет наблюдаться некоторый его недостаток, связанный с образованием вакансий в подрешетке кислорода, возникающих вследствие необходимости компенсации положительного заряда при легировании двухзарядными катионами стронция.

#### 4. Исследование размера частиц

##### Просвечивающая электронная микроскопия

В работе полученные порошки исследовали на просвечивавшем электронном микроскопе ZEISS Libra 120. Пробоподготовка проходила следующим образом. В стакан наливали 5 мл дистиллированной воды, добавляли 0.15 г желатина, 1 мг исследуемого образца и ставили на магнитную подогреваемую мешалку. Мешалка использовалась для более равномерного распределения наночастиц в приготовленной взвеси. Далее с помощью медной сетки с углеродной репликой подламливали объекты и вставляли в объектодержатель. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Согласно данным ПЭМ размер частиц колеблется в пределах от 25 до 35 нм. Зависимости размера частиц при переходе от незамещенных хромитов к допированным не установлено.

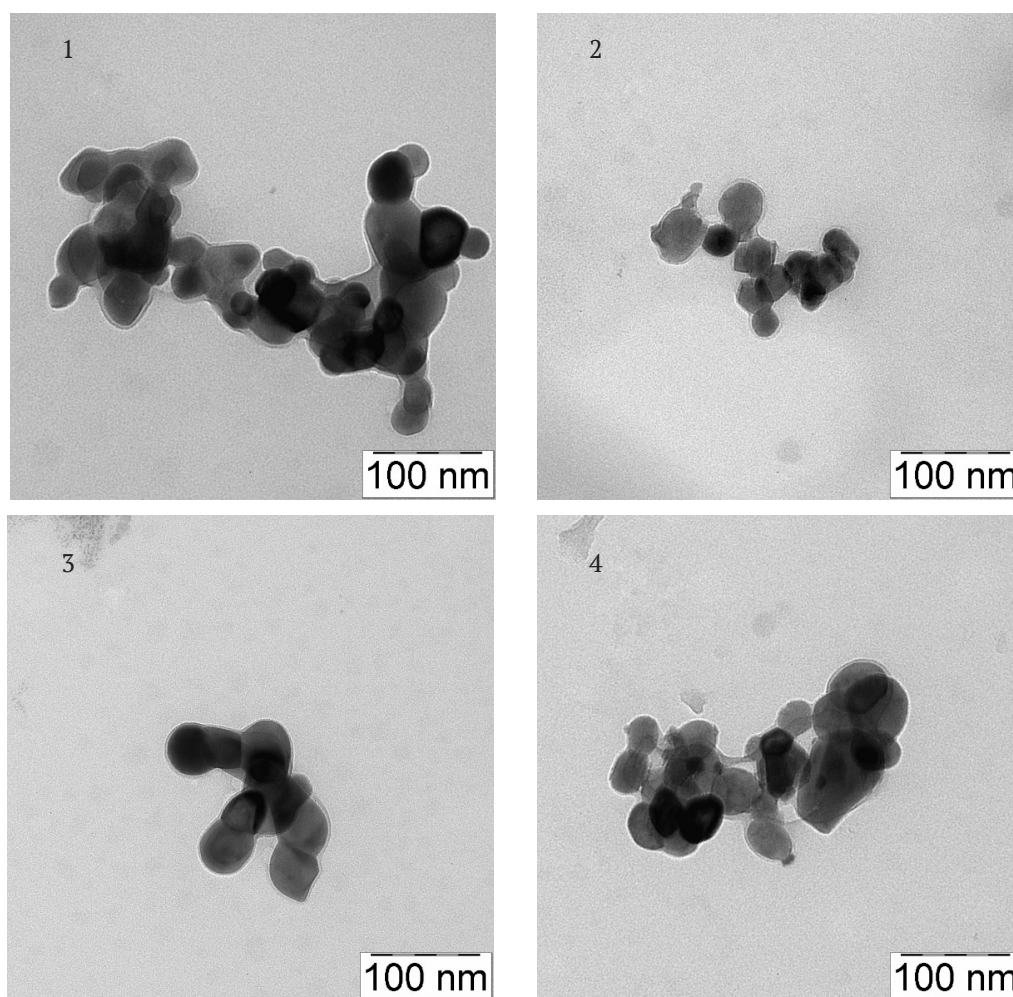


Рис. 2. ПЭМ изображения наночастиц: 1 –  $\text{LaCrO}_3$ ; 2 –  $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$ ; 3 –  $\text{GdCrO}_3$ ; 4 –  $\text{Gd}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CrO}_{3-\delta}$

## 5. Исследование газочувствительных свойств

Четырехзондовым методом Ван-дер-Пау было измерено удельное поверхностное сопротивление пленок, изготовленных из нанопорошков систем  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ). Методика была аналогичной, описанной в работах [22, 23]. Исследования проводились на воздухе (рис. 3) и в присутствии угарного газа (рис. 4). Измерения проводились 3 раза для каждого из образцов. Концентрация газа составляла 50 ppm, а температурный диапазон исследования 20–400 °С. Требуемая концентрация угарного газа достигалась путем разбавления аттестованной газовой смеси сухим синтетическим воздухом. Измерения про-

водились в стационарной системе (замкнутая камера объемом 50 мл). Перед каждым новым экспериментом система продувалась синтетическим воздухом.

Результаты измерения удельного сопротивления допированных образцов сравнивали с удельным сопротивлением незамещенных  $\text{LaCrO}_3$  и  $\text{GdCrO}_3$ .

В процессе измерения происходит адсорбция анализируемого газа восстановителя, в ходе которой свободные электроны адсорбирующегося газа переходят на поверхность сенсора, повышая число подвижных зарядов и снижая температуру начала резкого изменения сопротивления. Данное явление подтверждает, что полученные хромиты являются полупроводниками.

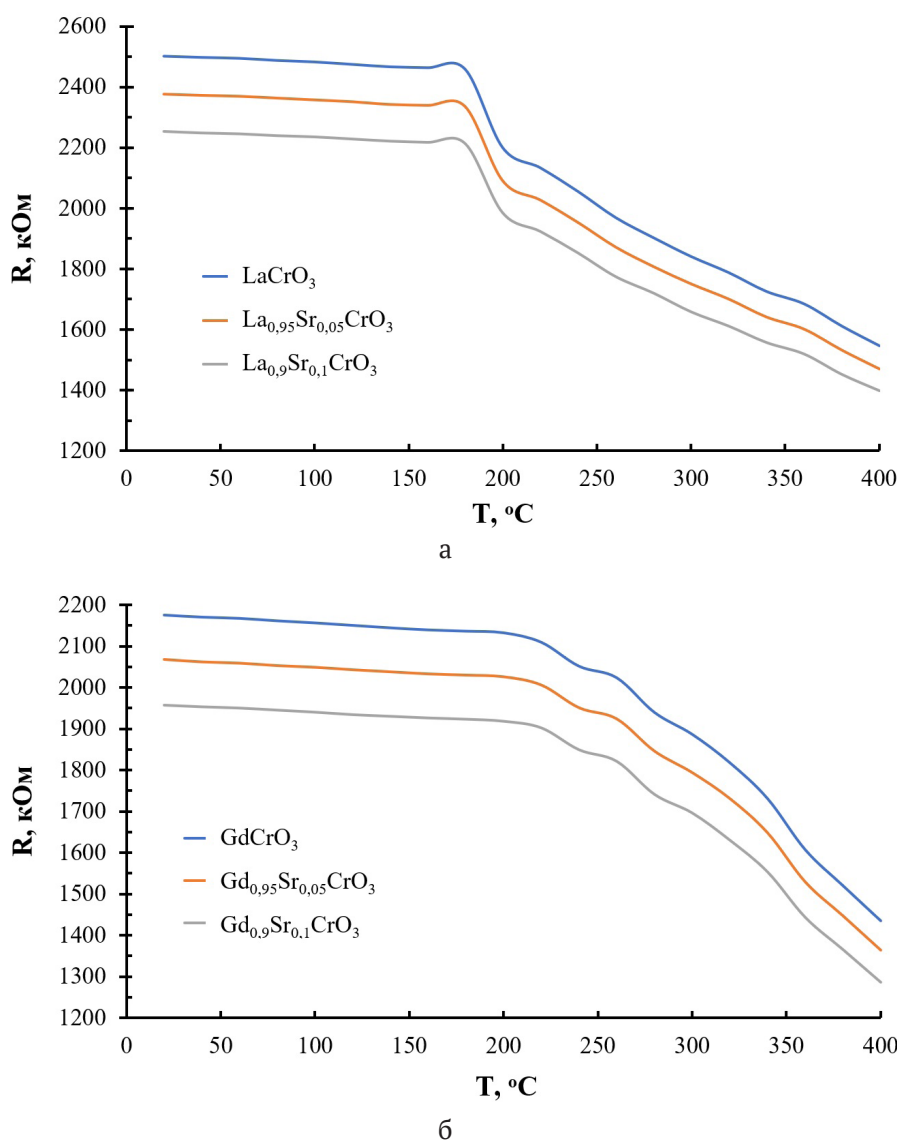
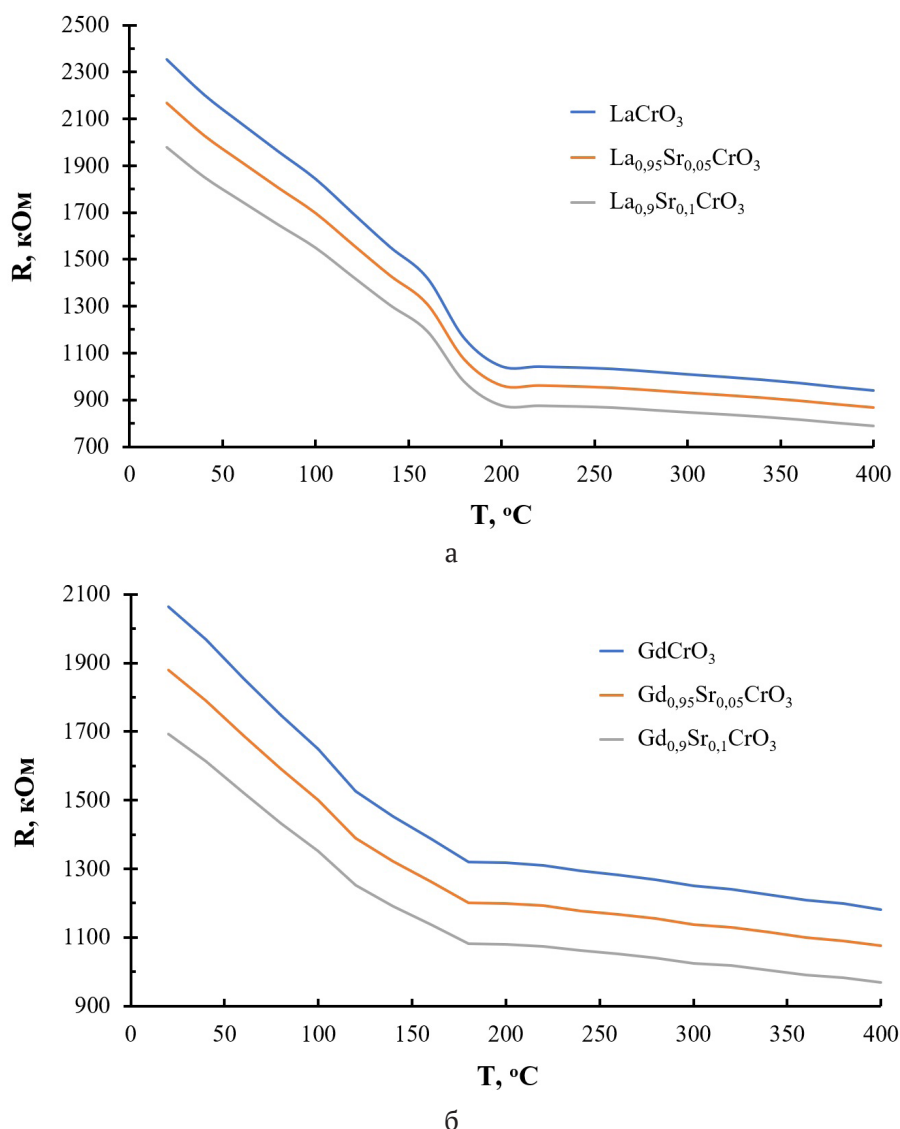


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления тонких пленок  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) (а) и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) (б) от температуры на воздухе



**Рис. 4.** Зависимость удельного сопротивления тонких пленок  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) (а) и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) (б) в присутствии в атмосфере угарного газа (50 ppm)

Внедрение ионов стронция в кристаллическую решетку хромита лантана и хромита гадолиния снижает их удельное сопротивление. Это объясняется ионным строением кристалла: появление нескомпенсированных зарядов в ходе замещения  $\text{La}^{3+}$  или  $\text{Gd}^{3+}$  на  $\text{Sr}^{2+}$  способствует формированию кислородных вакансий, которые приводят к уменьшению удельного сопротивления, что указывает на n-тип проводимости в хромитах лантана и гадолиния.

Согласно результатам измерения удельного сопротивления хромитов гадолиния и лантана сопротивление первого ниже. Это объясняется большим количеством кислородных вакансий в образцах систем  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ), обнаруженных методом ЛРСМА.

На основании полученных значений удельного сопротивления образцов был рассчитан сенсорный отклик с использованием формулы  $S_T = R_B/R_T$ , где  $S_T$  – газочувствительный отклик,  $R_B$  – удельное поверхностное сопротивление пленок на воздухе,  $R_T$  – удельное поверхностное сопротивление пленок в присутствии газа-восстановителя [24]; построены зависимости сенсорного отклика от температуры (рис. 5).

Согласно полученным данным, незамещенный и допированный стронцием хромит лантана проявляет наиболее сильный сенсорный отклик при на угарный газ ( $\text{CO}$ ) при 180 °C. Незамещенный и допированный хромит гадолиния при аналогичных температурах также показывает пиковое значение сенсорного откли-

ка, однако значение сенсорного отклика ниже, чем у образцов хромита лантана. Сравнение сенсорных откликов допированных образцов с незамещенными образцами показало, что внедрение стронция в системы позволило усилить сенсорный отклик, а повышение концентрации внедряемого стронция способствует усилению отклика.

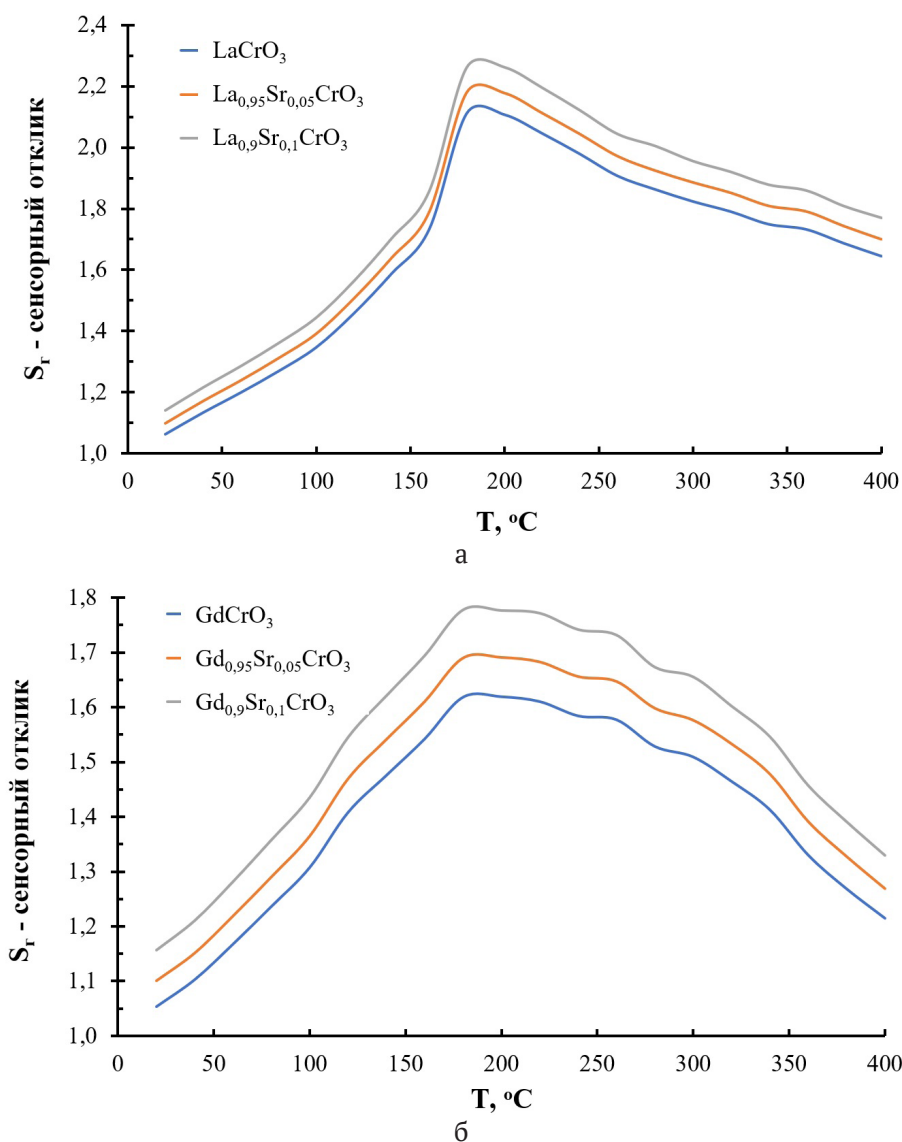
Из рис. 5а следует, что для систем  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) при температуре  $180^\circ\text{C}$  сенсорный отклик в присутствии угарного газа (концентрация 50 ppm) составил 2.11, 2.18 и 2.26 соответственно. Сам график имеет четкий максимум, что указывает на точность работы газового сенсора. Для систем  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) (рис. 5б) сенсорный отклик в аналогичных

условиях составил 1.62, 1.69 и 1.78 соответственно, что слабее отклика хромитов лантана. График в пике имеет схожие значения при  $180$  и  $200^\circ\text{C}$ .

Высокое значение сенсорного отклика хромитов лантана обуславливается его высоким удельным сопротивлением, так как в ходе адсорбции газа восстановителя на поверхности пленки, в системе увеличивается число носителей зарядов, что приводит к резкому изменению удельного сопротивления.

## 6. Выводы

Синтез нанопорошков  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  методом Печини позволил получить материалы с высокой степенью однородности и контролируемым размером частиц. Про-



**Рис. 5.** Зависимость сенсорного отклика на угарный газ (50 ppm) от температуры для тонких пленок  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) (а) и  $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_{3-\delta}$  ( $x = 0, 0.05$  и  $0.1$ ) (б)

ведённый рентгенофазовый анализ подтвердил наличие перовскитоподобной структуры синтезированных соединений и выявил влияние допирования ионами Sr<sup>2+</sup> на параметры кристаллической решётки. Встраивание допанта проявляется в изменении межплоскостных расстояний, связанных с разностью ионных радиусов замещаемого элемента и допанта. Допирование стронцием привело к увеличению концентрации кислородных вакансий, что положительно сказалось на сенсорных характеристиках материалов. Исследования газочувствительных свойств показали, что нанопорошки демонстрируют максимальный отклик на CO при 180 °C. Образцы с наибольшим содержанием ионов Sr<sup>2+</sup> проявили высокую чувствительность, что объясняется оптимальным балансом дефектной структуры и подвижности носителей заряда. Полученные результаты показывают перспективность применения данных наноматериалов для газовых сенсоров.

### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Конфликт интересов

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

### Список литературы

1. Анищик В. М., Конюшко Л. И., Ярмолевич В. А., Горбачевский Д. А., Герасимова Т. Г. Структура и свойства пленок диоксида олова. *Неорганические материалы*. 1995;31(4): 338–341.
2. Рембеза Е. С., Рембеза С. И., Свистова Т. В., Дырда Н. Н. Методы повышения газочувствительных свойств пленок SnO<sub>2</sub> для датчиков газов. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2006;4: 3–8. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9183222>
3. Kuklja M. M., Matrikov Y. A., Jansang B., Kotomin E. A. The Intrinsic defects, disordering, and structural stability of Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>Co<sub>y</sub>Fe<sub>1-y</sub>O<sub>3-δ</sub> perovskite solid solutions. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012;116: 18605–18611. <https://doi.org/10.1021/jp304055s>
4. Bulemo P. M., Kim I.-D. Recent advances in ABO<sub>3</sub> perovskites: their gas-sensing performance as resistive-type gas sensors. *Journal of the Korean Ceramic Societ.* 2020;57: 24–39. <https://doi.org/10.1007/s43207-019-00003-1>
5. Fergus J. W. Perovskite oxides for semiconductor-based gas sensors. *Sensors and Actuators B*. 2007;123: 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.10.051>
6. Zhu L. Y., Ou L. X., Mao L. W., Wu X.-Y., Liu Y.-P., Lu H. L. Advances in noble metal-decorated metal oxide nanomaterials for chemiresistive gas sensors: Overview.

*Nano-Micro Letters*. 2023;15(1). <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01047-z>

7. Avadhesh K. Y., Rajnees K. S., Prabhakar S. 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>

8. Wenbo Q., Zhenyu Y., Hongliang G., Renze Z., Fanli M. Perovskite-structured LaCoO<sub>3</sub> modified ZnO gas sensor and investigation on its gas sensing mechanism by first principle. *Sensors and Actuators: B. Chemical*. 2021;341: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130015>

9. Cerda J., Arbiol J., Dezanneau G., Diaz R., Morante J. R. Perovskite-type BaSnO<sub>3</sub> powders for high temperature gas sensor applications. *Sensors and Actuators: B. Chemical*. 2002;84: 21–25. [https://doi.org/10.1016/s0925-4005\(02\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s0925-4005(02)00005-9)

10. Yaoyu Y., Yanbai S., Pengfei Z., Rui L., Ang L. Fabrication, characterization and n-propanol sensing properties of perovskite-type ZnSnO<sub>3</sub> nanospheres based gas sensor. *Applied Surface Science*. 2020;509: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145335>

11. Balamurugan C., Lee D. W. Perovskite hexagonal YMnO<sub>3</sub> nanopowder as p-type semiconductor gas sensor for H<sub>2</sub>S detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015;221: 857–866. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.07.018>

12. 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<sub>3</sub> 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>

13. Немых Я. М., Кострюков В. Ф., Горбунов И. Н. Синтез нанопорошков хромита гадолиния и хромита лантана с газочувствительными свойствами. *Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2024;3: 13–21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=72799790>

14. Duran A., Falconi R., Mata J., Huerta L., Gonzalez M., Reguera E., Torres J. C. From LaCrO<sub>3</sub> towards LaCr<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.2</sub>Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.2</sub>O<sub>3</sub> high-entropy ceramic compound: crystal structure, dielectric and magnetic properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2025;45: 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116927>

15. Javed M., Arif Khan A., Kazmi J., ... Mohamed M. A. Variable range hopping transport and dielectric relaxation mechanism in GdCrO<sub>3</sub> rare-earth orthochromite perovskite. *Journal of Rare Earths*. 2023;42: 1304–1316. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.07.006>

16. Moreno L. C., Valencia J. S., Landínez Téllez D. A., ... Fajardo F. Preparation and structural study of LaMnO<sub>3</sub> magnetic material. *Magnetism and Magnetic Materials*. 2008;320(14): e19–e21. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.02.052>

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

18. Кострюков В. Ф., Паршина А. С., Миттова И. Я. Создание тонких пленок YFeO<sub>3</sub>, допированного Sr<sup>2+</sup>,

обладающих газочувствительными свойствами. *Неорганические материалы*. 2024;60(8): 1000–1009. <https://doi.org/10.31857/S0002337X24080097>

19. JCPDC PCPDFWIN : A Windows Retrieval. Display program for Accessing the ICDD PDF. 2 Data base, Inernation Centre for Diffraction Data. 1997.

20. Бугаенко Л. Т., Рябых С. М., Бугаенко А. Л. Почти полная система средних ионных кристаллографических радиусов и ее использование для определения потенциалов ионизации. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2008;49(6): 363–384. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11642633>

21. Криштал М. М., Ясников И. С., Полуниин В. И., Филатов А. М., Ульяненок А. Г. *Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ*. М.: Техносфера; 2009. 208 с.

22. *Четырехзондовый метод измерения электрического сопротивления полупроводниковых материалов: учебно-методическое пособие по спецпрактикуму «Физика полупроводниковых материалов и приборов» для студентов физического факультета* / под ред. Н. А. Поклонского. Минск: БГУ, 1998. 46 с.

23. Рембеза С. И. Микроструктура и физические свойства тонких пленок  $\text{SnO}_2$ . *Физика и техника полупроводников*. 2001;35(7): 796–800. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21321639>

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>

### Информация об авторах

*Немых Яромир Максимович*, аспирант 1 года обучения кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация)

<https://orcid.org/0009-0009-3189-6018>

[yaromir0202@gmail.com](mailto:yaromir0202@gmail.com)

*Кострюков Виктор Фёдорович*, д. х. н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5753-5653>

[vc@chem.vsu.ru](mailto:vc@chem.vsu.ru)

*Горбунов Иван Николаевич*, магистрант 1-го года обучения кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0001-5170-7909>

[wot4114@gmail.com](mailto:wot4114@gmail.com)

*Томина Елена Викторовна*, д. х. н., заведующий кафедрой химии Воронежского государственного лесотехнического университета (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

[tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru)

*Поступила в редакцию 08.08.2025; одобрена после рецензирования 03.10.2025; принята к публикации 15.10.2025; опубликована онлайн 01.04.2026.*