

УДК 541.6+544.1

КИСЛОРОДНО-ИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В ИЗОВАЛЕНТНО-ДОПИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ ПЕРОВСКИТАХ НА ОСНОВЕ BaLaInO_4 ¹

© 2023 г. А. О. Бедарькова^{a, b, *}, П. В. Черемисина^{a, b}, Е. В. Абакумова^{a, b}, И. С. Федорова^b,
К. Г. Давлетбаев^{a, b}, Н. А. Тарасова^{a, b}, И. Е. Анимца^{a, b}

^aИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^bУральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: a.o.galisheva@urfu.ru

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

После доработки 28.09.2022 г.

Принята к публикации 28.10.2022 г.

В работе изучена кислородно-ионная проводимость изовалентно-допированных сложных оксидов, характеризующихся структурой Раддлсдена–Поппера. Путем замещения в La-подрешетке впервые получен образец $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$, исследованы его транспортные свойства. Приведена сравнительная характеристика результатов с данными для образцов, полученных ранее при изовалентном замещении в In-подрешетке BaLaInO_4 . Показано, что введение допанта приводит к росту вклада кислородно-ионной составляющей проводимости, а также к увеличению общей электропроводности вплоть до ~2 порядков величины.

Ключевые слова: структура Раддлсдена–Поппера, BaLaInO_4 , изовалентное допирование, кислород-ионная проводимость

DOI: 10.31857/S0424857023040035, **EDN:** ANZTXH

ВВЕДЕНИЕ

Поиск сложнооксидных соединений с заданными свойствами, пригодных в качестве электродных и электролитных материалов в электрохимических устройствах, остается актуальным. В последние годы интерес многих ученых, занимающихся разработкой и созданием электродов, потенциально пригодных для использования в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ), сфокусирован на соединениях со структурой слоистых перовскитов. Одними из наиболее перспективных считаются сложные оксиды на основе $\text{Ln}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ [1–5]. Можно предположить, что использование однотипных по структуре электродов и электролитов поможет решить одну из важных проблем при создании ТОТЭ. А именно, проблему их совместимости в электрохимическом устройстве.

Среди сложных оксидов, характеризующихся блочно-слоевой структурой Раддлсдена–Поппера и обладающих ионной проводимостью, известны соединения на основе LaSrInO_4 [6–10],

BaNdInO_4 [11–16] и BaLaInO_4 [17, 18]. Ранее нами установлено, что акцепторное и донорное допирование катионных подрешеток BaLaInO_4 позволяет увеличить ионную проводимость до 1.5 порядка величины [19–21]. Данное явление было объяснено влиянием двух факторов: 1) концентрационного, а именно образованием дополнительных заряженных кислородных дефектов (кислородных вакансий и междоузельного кислорода в случаях акцепторного и донорного допирования соответственно); 2) геометрического, заключающегося в расширении межслоевого пространства в структуре, облегчающего транспорт заряженных частиц. Выявить доминирующий фактор удалось методом изовалентного допирования In-подрешетки BaLaInO_4 . Поскольку введение ионов того же заряда (Y^{3+} , Sc^{3+}) вместо In^{3+} не создает кислородных дефектов, то наблюдаемое увеличение значений проводимости (до 2 порядков величины для Y-допированных соединений) можно объяснить только влиянием геометрического фактора [22, 23]. Остается неясным, будут ли наблюдаемые закономерности проявляться при изовалентном допировании La-подрешетки BaLaInO_4 .

¹ По материалам доклада на 16-м Международном Совещании “Фундаментальные проблемы ионники твердого тела”, Черноголовка, 27.06.–03.07.2022.

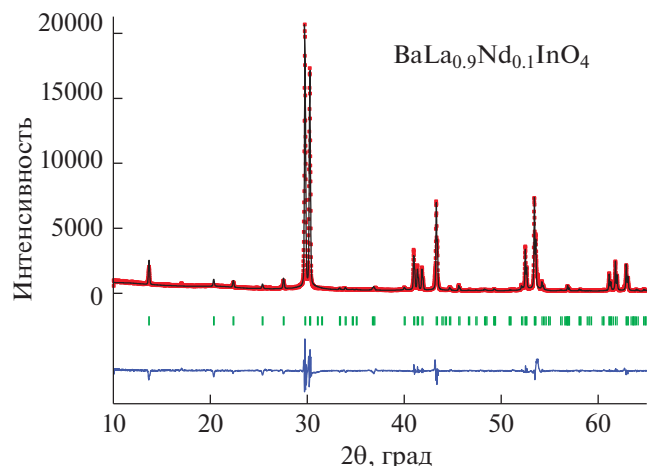


Рис. 1. Рентгенограмма образца $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$, на которой показаны экспериментальные (точки), расчетные (линия), разностные (внизу) данные и угловые положения рефлексов (штрихи).

Исходя из вышесказанного, в настоящей работе представлено исследование физико-химических свойств сложного оксида $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$, полученного при изовалентном замещении части ионов La^{3+} на ионы Nd^{3+} . Проведена его рентгенофазовая аттестация, оценена морфология поверхности порошкового образца, исследованы транспортные свойства при варьировании внешних параметров окружающей среды (T , $p\text{O}_2$). Обобщены и сделаны выводы результатов исследования по изовалентному допированию сложного оксида BaLaInO_4 .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез сложного оксида $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ проводили твердофазным методом из предварительно осушенных оксидов и карбонатов соответствующих металлов на воздухе при ступенчатом повышении температуры. Отжиг проводили с 800 до 1300°C с шагом 100°C и выдержкой 24 ч при промежуточных перетираниях в агатовой ступке в среде этилового спирта.

Рентгенографический анализ (РФА) был выполнен на дифрактометре Bruker Advance D8 в CuK_α -излучении при напряжении на трубке 40 кВ и токе 40 мА. Съемка производилась в интервале $2\theta = 20^\circ\text{--}80^\circ$ с шагом 0.05° и экспозицией 1 с на точку. Расчеты параметров решетки проводили с помощью программы FullProf Suite.

Морфология порошкообразного образца была изучена с помощью настольного сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Thermo Scientific “Phenom” Pharos.

Электропроводность исследуемого образца изучалась в атмосфере пониженной влажности

(“сухая атмосфера”). Необходимое значение влажности задавали циркуляцией газа через порошкообразный оксид фосфора P_2O_5 ($p\text{H}_2\text{O} = 3.5 \times 10^{-5}$ атм). Кроме того, для предотвращения возможной карбонизации керамики проводилось предварительное удаление углекислого газа CO_2 из воздуха с использованием реактива “Аскарит”. Влажность газов контролировали измерителем влажности газов ИВГ-1 МК-С.

Для измерений электрических свойств образец $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ готовили в виде таблетки, спекание проводили при температуре 1300°C в течение 24 ч. Плотность образца составила ~90–93%. Припекание платиновых электродов проводили при температуре 900°C в течение 3 ч.

Изучение электропроводности при варьировании температуры либо парциального давления кислорода в газовой фазе проводили методом электрохимического импеданса в частотном диапазоне 1 Гц–1 МГц с амплитудой сигнала 15 мВ с использованием измерителя параметров импеданса Elins Z-1000P. Измерения температурных зависимостей электропроводности проводили с предварительной изотермической выдержкой в течение 60 мин при 900°C и дальнейшим охлаждением до 300°C со скоростью 1°C/мин. Для варьирования парциального давления кислорода $p\text{O}_2$ в газовой фазе использовались кислородные насос и датчик из керамики Y-стабилизированного ZrO_2 . Все электрохимические измерения были выполнены в условиях равновесия с T , $p\text{H}_2\text{O}$, $p\text{O}_2$ в атмосферах воздуха и аргона. Для расчетов брались значения сопротивления, полученные при фиксировании постоянства значений во времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование структуры сложного оксида $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ методом РФА показало, что образец был получен однофазным и являлся структурным недопированным BaLaInO_4 . Результаты полнопрофильного анализа $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ приведены на рис. 1.

Синтезированный образец характеризуется ромбической симметрией с пространственной группой $Pbca$. Параметры и объем элементарной ячейки, полученные при обработке рентгенограммы, приведены в табл. 1. Для сравнения в таблице также приведены данные, полученные ранее для образцов, полученных методом изовалентного допирования подрешетки индия в сложном оксиде BaLaInO_4 .

Несмотря на меньший ионный радиус Nd^{3+} относительно ионов La^{3+} ($r_{\text{La}^{3+}} = 1.216 \text{ \AA}$, $r_{\text{Nd}^{3+}} = 1.163 \text{ \AA}$ [24]), замещение части ионов лантана на неодим приводит к росту параметра a , параметры b и c при этом изменяются незначительно. Объем

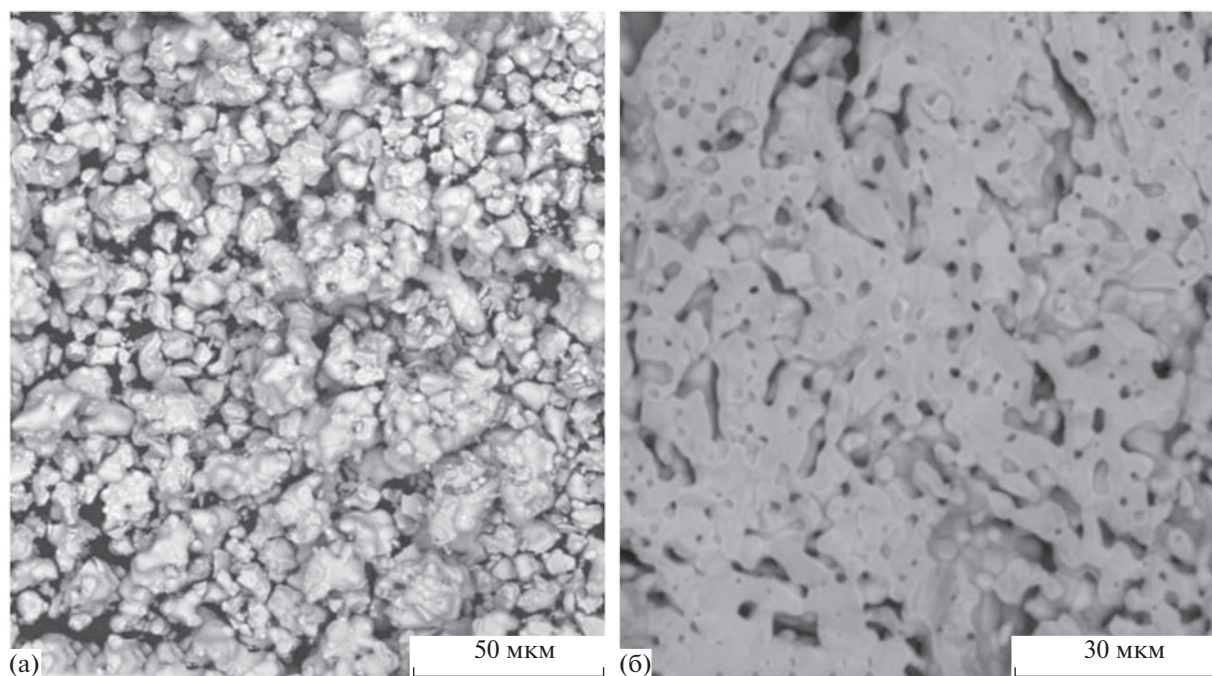
Таблица 1. Параметры и объем ячейки сложных оксидов BaLaInO_4 , $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$, $\text{BaLaIn}_{0.9}\text{Sc}_{0.1}\text{O}_4$ [22] и $\text{BaLaIn}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_4$ [23]

Образец	a , Å	b , Å	c , Å	Объем ячейки, Å ³
BaLaInO_4	12.932(3)	5.906(0)	5.894(2)	450.19(5)
$\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$	12.948(5)	5.907(2)	5.903(5)	451.55(7)
$\text{BaLaIn}_{0.9}\text{Sc}_{0.1}\text{O}_4$ [22]	12.951(9)	5.895(1)	5.883(2)	449.19(8)
$\text{BaLaIn}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_4$ [23]	12.969(1)	5.937(9)	5.911(6)	455.24(7)

элементарной ячейки увеличивается. Подобная закономерность в увеличении параметра a наблюдалась также при изовалентном замещении в In-подрешетке для образца $\text{BaLaIn}_{0.9}\text{Sc}_{0.1}\text{O}_4$ [22], где ионный радиус Sc^{3+} несколько меньше ионного радиуса In^{3+} ($r_{\text{In}^{3+}} = 0.80$ Å, $r_{\text{Sc}^{3+}} = 0.745$ Å [24]). Однако в этом случае наблюдалось уменьшение параметров b и c , и в целом объема элементарной ячейки. При изовалентном замещении Y^{3+} , характеризующегося большим по значению ионным радиусом, чем In^{3+} , происходило увеличение параметров и объема ячейки [23]. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что изовалентное замещение катионных подрешеток (La^{3+} , In^{3+}) сложного оксида BaLaInO_4 ионами различной природы, независимо от их радиуса, приводит к росту параметра a , т.е., к расширению межслоевого расстояния в блочно-слоевой структуре. Аналогичный эффект увеличения параметра a при введении иона-допанта меньшего радиуса

был выявлен для донорно-допированных сложных оксидов на основе BaLaInO_4 [18].

Изучение морфологии поверхности образца $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ было выполнено с использованием метода сканирующей электронной микроскопии совместно с энергодисперсионным анализом. На рис. 2 представлены СЭМ-изображения порошка и скола керамического образца. Как видно, образец состоит из зерен неправильной округлой формы размером ~ 3 – 5 мкм, образующих агломераты размером до 15 мкм. В межзеренной области не выявлено примесных фаз. Соотношение катионов, полученное при ЭДС-анализе скола керамического образца, хорошо коррелирует со значениями, рассчитанными теоретически. Так, содержание Ba в образце составляет 33.3–33.6 ат. % (теор. 33.3 ат. %), содержание La 29.8–30.3 ат. % (теор. 30.0 ат. %), содержание Nd 2.9–3.2 ат. % (теор. 3.3 ат. %) и содержание In 33.2–33.7 ат. % (теор. 33.4 ат. %).

**Рис. 2.** СЭМ-изображения (а) поверхности порошка и (б) скола керамического образца $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$.

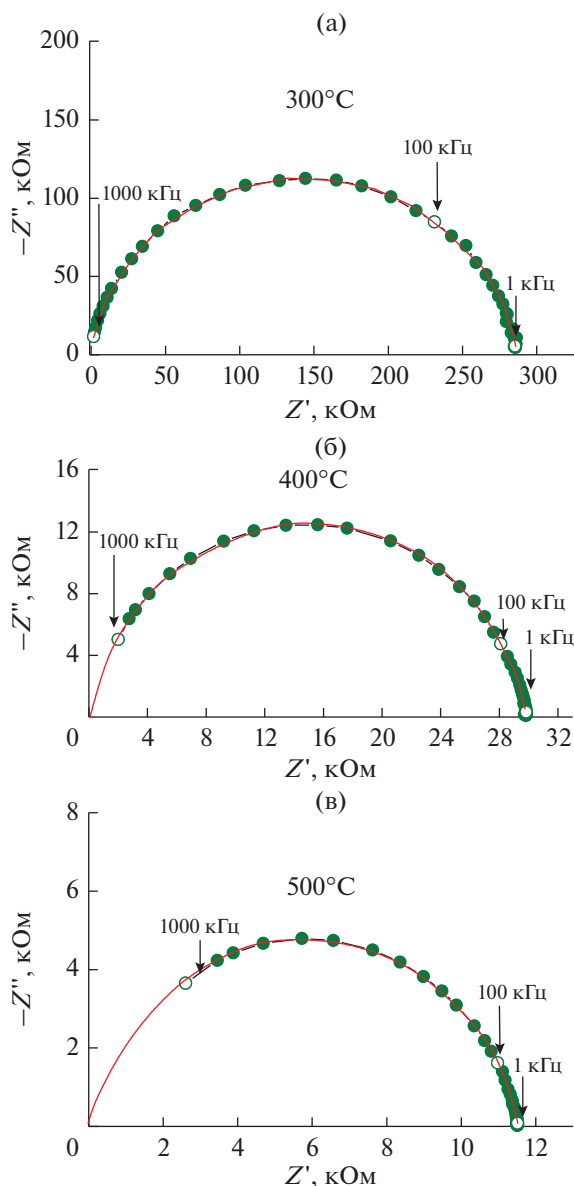


Рис. 3. Годографы импеданса для образца $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ в атмосфере сухого аргона при температурах (а) 300, (б) 400 и (в) 500°C.

Для того, чтобы исключить возможное влияние паров воды из атмосферы на общую проводимость образца, исследования электропроводности проводились в атмосфере с контролируемой влажностью. На рис. 3 приведены типичные годографы импеданса для состава $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ в атмосфере сухого аргона при температурах 300, 400 и 500°C. Для расчета величины электропроводности брали значения сопротивления, полученные при пересечении полуокружности, выходящей из нуля, с осью абсцисс.

Измерения температурных зависимостей общей электропроводности проводили при различ-

ных значения $p\text{O}_2$. Ранее было установлено, что сложный оксид BaLaInO_4 является смешанным ионно-электронным проводником на воздухе [25]. Исходя из этого, измерения электрических свойств проводились не только в атмосфере сухого воздуха ($p\text{O}_2 = 0.21$ атм), но и в атмосфере сухого аргона ($p\text{O}_2 \sim 10^{-5}$ атм). На рис. 4 приведены температурные зависимости электропроводности допированного $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ и недопированного BaLaInO_4 в атмосферах с различным $p\text{O}_2$, а также зависимости электропроводности от парциального давления кислорода.

Как видно, значения проводимости для Nd-допированного образца выше на ~ 1.5 порядка величины в атмосфере сухого воздуха по сравнению со значениями для недопированного BaLaInO_4 . В атмосфере сухого аргона (т.е., при пониженном значении $p\text{O}_2$, в условиях доминирования кислородно-ионной проводимости) различие в величинах проводимости достигает ~ 2 порядка величины в области низких температур. При этом допированный образец $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$, как и недопированный, характеризуется смешанным ионно-электронным характером проводимости во всем исследуемом температурном интервале. Смешанный характер проводимости на воздухе (0.21 атм) также подтверждается наличием наклона на зависимостях электропроводности от парциального давления кислорода, представленных на рис. 4б и 4в. При этом значения, полученные в атмосфере сухого аргона, соответствуют точке на плато, отвечающего области кислородно-ионной проводимости. Иными словами, значения проводимости, полученные в атмосфере сухого аргона, соответствуют значениям кислородно-ионной проводимости.

На рис. 5 приведены температурные зависимости проводимости исследуемого соединения $\text{BaLa}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{InO}_4$ в сравнении с образцами, полученными путем изовалентного допирования In-подрешетки BaLaInO_4 в атмосфере сухого воздуха (общая проводимость, рис. 4а) и в атмосфере сухого аргона (кислородно-ионная проводимость, рис. 4б). Из рисунка видно, как в случае допирования подрешетки индия, так и лантана, введение допанта приводило к росту значений электропроводности.

Используя данные проводимости, полученные для ранее исследованных изовалентно-допированных образцов в атмосферах сухого воздуха и сухого аргона, был рассчитан вклад кислородно-ионной проводимости в общую проводимость при различных температурах (табл. 2). Доля кислородно-ионной проводимости была рассчитана как отношение значений проводимости в сухом аргоне к значениям проводимости, полученным в атмосфере сухого воздуха. Ошибка определения

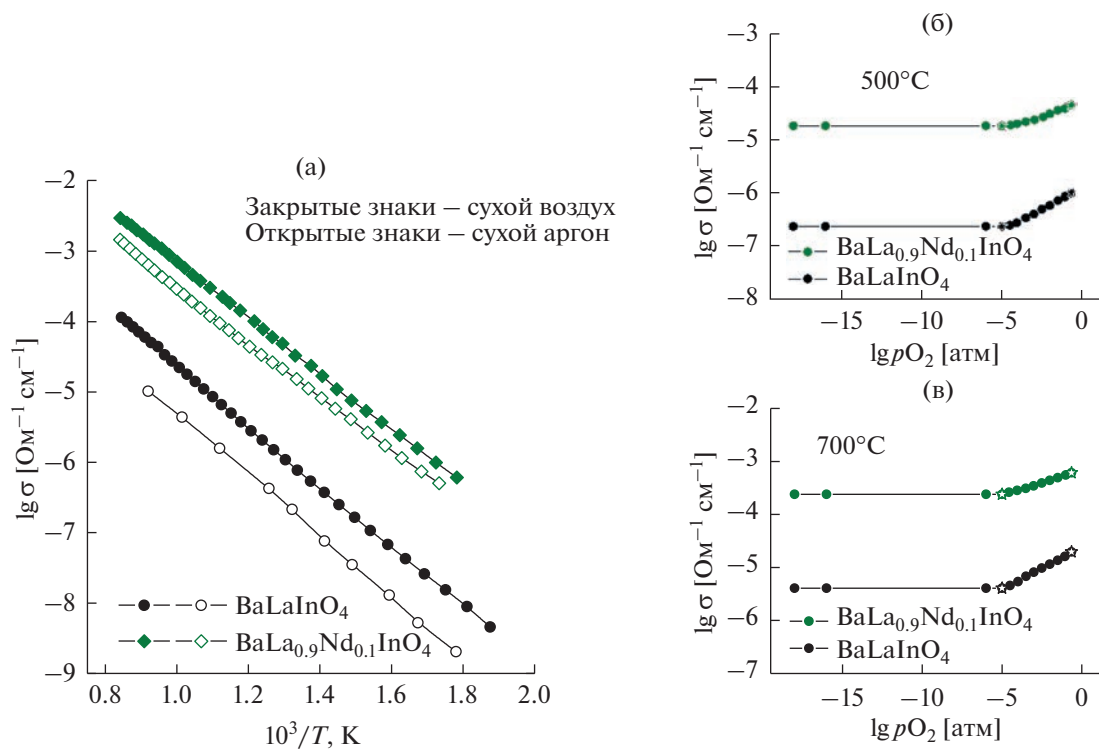


Рис. 4. (а) Температурные зависимости электропроводности для образцов BaLaInO₄ и BaLa_{0.9}Nd_{0.1}InO₄ в атмосфере сухого воздуха (закрытые знаки) и сухого аргона (открытые знаки), а также зависимости электропроводности от парциального давления кислорода (закрытые знаки) и значения электропроводности, полученные при измерении температурных зависимостей (открытые знаки) при (б) 500 и (в) 700°C.

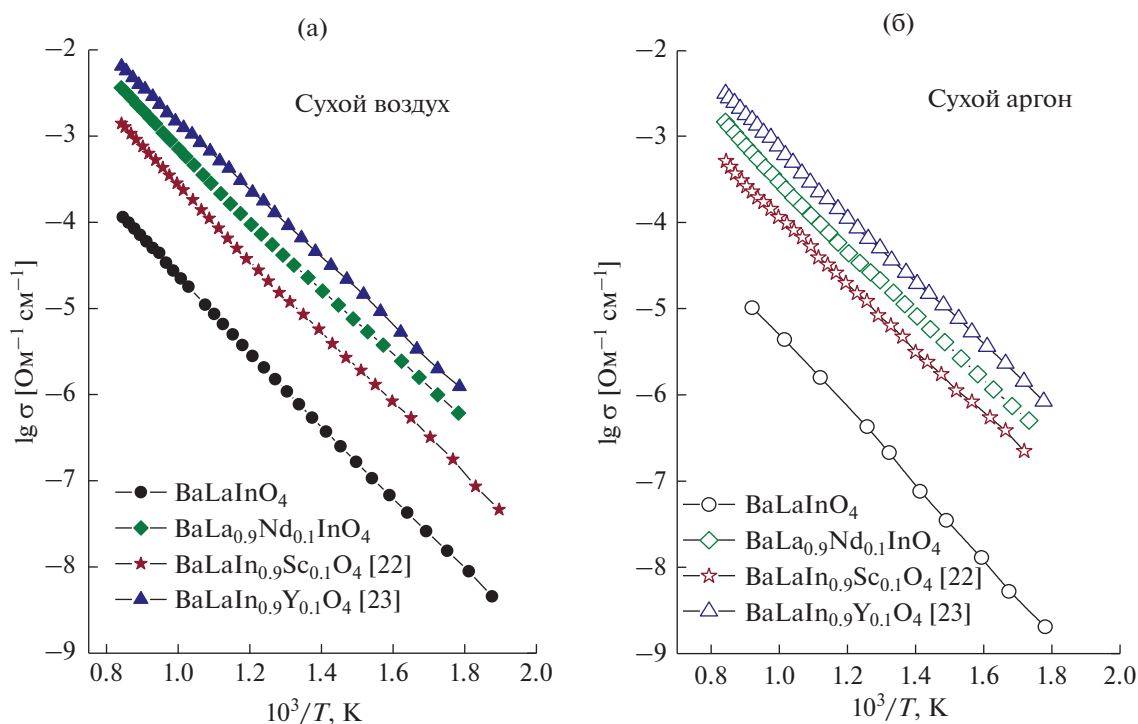


Рис. 5. Температурные зависимости проводимости для BaLaInO₄, BaLa_{0.9}Nd_{0.1}InO₄, BaLaIn_{0.9}Sc_{0.1}O₄ [22] и BaLaIn_{0.9}Y_{0.1}O₄ [23] в атмосферах сухого воздуха (а) и сухого аргона (б).

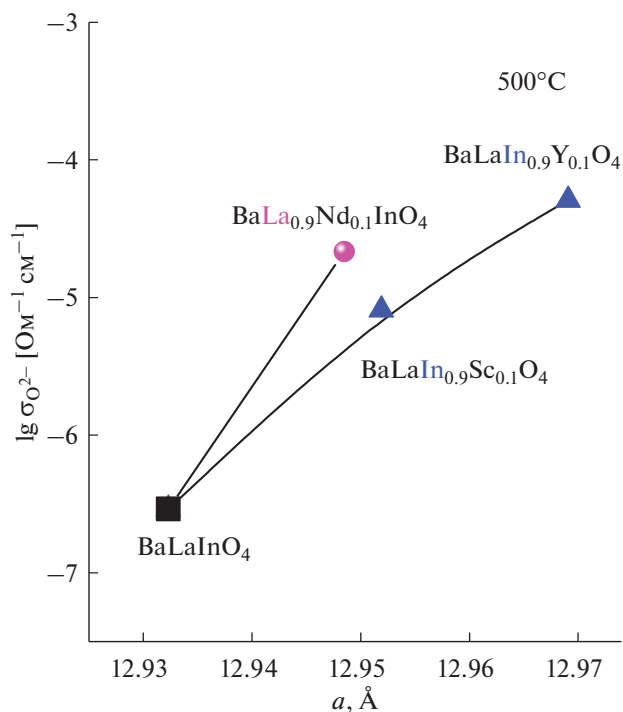


Рис. 6. Зависимость кислородно-ионной проводимости от параметра элементарной ячейки для составов BaLaInO₄, BaLa_{0.9}Nd_{0.1}InO₄, BaLaIn_{0.9}Sc_{0.1}O₄, BaLaIn_{0.9}Y_{0.1}O₄.

обусловлена погрешностью измерений методом электрохимического импеданса, которая составляет 0.3–0.5%

Для недопированного сложного оксида BaLaInO₄ доля кислородно-ионного переноса составляет 20% во всем температурном интервале. Изовалентное допирование в обеих подрешетках позволяет увеличить долю кислородно-ионного транспорта до 40% для Nd-допированного образца, и до 50% для Y-допированного. При этом для Sc-допированного образца доля кислородно-ионной проводимости возрастает с уменьшением температуры, достигая значения ~80%.

Таблица 2. Доля кислородно-ионной проводимости (%) для BaLaInO₄ и изовалентно-допированных соединений на его основе в сухом воздухе

Состав	900°C	500°C	300°C
BaLaInO ₄	20%	20%	20%
BaLa _{0.9} Nd _{0.1} InO ₄	40%	40%	40%
BaLaIn _{0.9} Sc _{0.1} O ₄ [22]	35%	60%	80%
BaLaIn _{0.9} Y _{0.1} O ₄ [23]	50%	50%	50%

Используя ранее полученные данные по общей электропроводности для образцов BaLaIn_{0.9}Sc_{0.1}O₄ [22] и BaLaIn_{0.9}Y_{0.1}O₄ [23], были рассчитаны значения кислородно-ионной проводимости. На рис. 6 приведена зависимость значений кислородно-ионной проводимости от параметра a .

Несмотря на природу иона-допанта и тип подрешетки, наблюдается закономерность увеличения кислородно-ионной проводимости с ростом параметра a элементарной ячейки, т.е. с увеличением межслоевого расстояния в структуре Раддлсдена–Поппера. В целом, можно заключить, что изовалентное допирование является перспективным методом для улучшения электротранспортных характеристик блочно-слоевых сложных оксидов на основе BaLaInO₄.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено изовалентное допирование ионами Nd³⁺ La-подрешетки сложного оксида BaLaInO₄. Образец состава BaLa_{0.9}Nd_{0.1}InO₄ был получен однофазным и являлся изоструктурным недопированному образцу. Несмотря на меньший радиус Nd, происходит увеличение параметра a , что коррелирует с ранее полученными результатами по изовалентному допированию In-подрешетки BaLaInO₄. Полученный BaLa_{0.9}Nd_{0.1}InO₄, как и BaLaInO₄, является смешанным (ионно-электронным) проводником, при этом значения электропроводности допированного образца выше на ~1.5 порядка величины. Установлено, что изовалентное допирование обеих катионных подрешеток (La³⁺, In³⁺) BaLaInO₄ увеличивает долю кислородно-ионного транспорта с 20 до 60% при 500°C. Геометрический фактор, т.е. увеличение межслоевого расстояния в блочно-слоевой структуре, является значимым фактором при увеличении кислородно-ионной проводимости.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 22-79-10003.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarutin, A., Gorshkov, Yu., Bainov, A., Vdovin, G., Vylkov, A., Lyagaeva, J., and Medvedev, D., Barium-doped nickelates Nd_{2-x}Ba_xNiO_{4+δ} as promising electrode materials for protonic ceramic electrochemical cells, *Ceramics Int.*, 2020, vol. 46, p. 24355.

2. Tarutin, A., Lyagaeva, J., Farlenkov, A., Plaksin, S., Vdovin, G., Demin, A., and Medvedev, D., A Reversible Protonic Ceramic Cell with Symmetrically Designed $\text{Pr}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ -Based Electrodes: Fabrication and Electrochemical Features, *Materials*, 2019, vol. 12, p. 118.
3. Bassat, J.M., Burriel, M., Wahyudi, O., Castaing, R., Ceretti, M., Veber, P., Weill, I., Villesuzanne, A., Grenier, J.C., and Paulus, W., Anisotropic oxygen diffusion properties in $\text{Pr}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ and $\text{Nd}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ single crystals, *J. Phys. Chem. C*, 2013, vol. 117, p. 26466.
4. Lee, D., Grimaud, A., Crumlin, E.J., Mezghani, K., Habib, M.A., Feng, Z.X., Hong, W.T., Biegalski, M.D., Christen, H.M., and Shao-Horn, Y., Strain influence on the oxygen electrocatalysis of the (100)-oriented epitaxial $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ thin films at elevated temperatures, *J. Phys. Chem. C*, 2013, vol. 117, p. 18789.
5. Boehm, E., Bassat, J.M., Dordor, P., Mauvy, F., Grenier, J.C., and Stevens, P., Oxygen diffusion and transport properties in non-stoichiometric $\text{Ln}_{2-x}\text{NiO}_{4+\delta}$ oxides, *Solid State Ionics*, 2005, vol. 176, p. 2717.
6. Troncoso, L., Alonso, J.A., and Aguadero, A., Low activation energies for interstitial oxygen conduction in the layered perovskites $\text{La}_{1+x}\text{Sr}_{1-x}\text{InO}_{4+\delta}$, *J. Mater. Chem. A*, 2015, vol. 3, p. 17797.
7. Troncoso, L., Mariño, C., Arce, M.D., and Alonso, J.A., Dual Oxygen Defects in Layered $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{0.8-x}\text{Ba}_x\text{InO}_{4+\delta}$ ($x = 0.2, 0.3$) Oxide-Ion Conductors: A Neutron Diffraction Study, *Materials*, 2019, vol. 12, p. 1624.
8. Kato, S., Ogasawara, M., Sugai, M., and Nakata, Sh., Synthesis and oxide ion conductivity of new layered perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{InO}_{4-\delta}$, *Solid State Ionics*, 2002, vol. 149, p. 53.
9. Troncoso, L., Alonso, J.A., Fernández-Díaz, M.T., and Aguadero, A., Introduction of interstitial oxygen atoms in the layered perovskite $\text{LaSrIn}_{1-x}\text{B}_x\text{O}_{4+\delta}$ system ($\text{B} = \text{Zr}, \text{Ti}$), *Solid State Ionics*, 2015, vol. 282, p. 82.
10. Troncoso, L., Arce, M.D., Fernández-Díaz, M.T., Mogni, L.V., and Alonso, J.A., Water insertion and combined interstitial-vacancy oxygen conduction in the layered perovskites $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{0.8-x}\text{Ba}_x\text{InO}_{4+\delta}$, *New J. Chem.*, 2019, vol. 43, p. 6087.
11. Fujii, K., Esaki, Y., Omoto, K., Yashima, M., Hoshikawa, A., Ishigaki, T., and Hester, J.R., New Perovskite-Related Structure Family of Oxide-Ion Conducting Materials NdBaInO_4 , *Chem. Mater.*, 2014, vol. 26, p. 2488.
12. Fujii, K., Shiraiwa, M., and Esaki, Y., Improved oxide-ion conductivity of NdBaInO_4 by Sr doping, *J. Mater. Chem. A*, 2015, vol. 3, p. 11985.
13. Ishihara, T., Yan, Yu, Sakai, T., and Ida, Sh., Oxide ion conductivity in doped NdBaInO_4 , *Solid State Ionics*, 2016, vol. 288, p. 262.
14. Yang, X., Liu, Sh., Lu, F., Xu, J., and Kuang, X., Acceptor Doping and Oxygen Vacancy Migration in Layered Perovskite NdBaInO_4 -Based Mixed Conductors, *J. Phys. Chem. C*, 2016, vol. 120, p. 6416.
15. Fujii, K. and Yashima, M., Discovery and development of BaNdInO_4 – A brief review, *J. Ceram. Soc. JAPAN*, 2018, vol. 126, p. 852.
16. Zhou, Yu, Shiraiwa, M., Nagao, M., Fujii, K., Tanaka, I., Yashima, M., Baque, L., Basbus, J.F., Mogni, L.V., and Skinner, S.J., Protonic Conduction in the BaNdInO_4 Structure Achieved by Acceptor Doping, *Chem. Mater.*, 2021, vol. 33, p. 2139.
17. Korona, D.V., Obrubova, A.V., Kozlyuk, A.O., and Animitsa, I.E., Hydration and Proton Transport in $\text{BaCa}_x\text{La}_{1-x}\text{InO}_{4-0.5x}$ ($x = 0.1$ and 0.2) Phases with Layered Structure, *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2018, vol. 92, p. 1727.
18. Tarasova, N., Animitsa, I., Galisheva, A., and Korona, D., Incorporation and Conduction of Protons in Ca, Sr, Ba-Doped BaLaInO_4 with Ruddlesden–Popper Structure, *Materials*, 2019, vol. 12, p. 1668.
19. Tarasova, N., Animitsa, I., and Galisheva, A., Electrical properties of new protonic conductors $\text{Ba}_{1+x}\text{La}_{1-x}\text{InO}_{4-0.5x}$ with Ruddlesden–Popper structure, *J. Solid State Electrochem.*, 2020, vol. 24, p. 1497.
20. Tarasova, N., Galisheva, A., and Animitsa, I., Improvement of oxygen-ionic and protonic conductivity of BaLaInO_4 through Ti doping, *Ionics*, 2020, vol. 26, p. 5075.
21. Tarasova, N., Animitsa, I., and Galisheva, A., Effect of acceptor and donor doping on the state of protons in block-layered structures based on BaLaInO_4 , *Solid State Comm.*, 2021, vol. 323, p. 14093.
22. Tarasova, N.A., Galisheva, A.O., Animitsa, I.E., and Lebedeva, E.L., Oxygen-ion and proton transport in Sc-doped layered perovskite BaLaInO_4 , *Russ. J. Electrochem.*, 2021, vol. 57, p. 1008.
23. Tarasova, N., Galisheva, A., Animitsa, I., Anokhina, I., Gilev, A., and Cheremisina, P., Novel mid-temperature $\text{Y}^{3+} \rightarrow \text{In}^{3+}$ doped proton conductors based on the layered perovskite BaLaInO_4 , *Ceramics Int.*, vol. 48, p. 15677.
24. Shannon, R.D., Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides, *Acta Cryst.*, 1976, vol. A32, p. 751.
25. Tarasova, N. and Animitsa, I., Materials $\text{A}^{\text{II}}\text{LnInO}_4$ with Ruddlesden–Popper structure for electrochemical applications: relationship between ion (oxygen-ion, proton) conductivity, water uptake and structural changes, *Materials*, 2022, vol. 15, p. 114.