

МРНТИ: 44.31.39

Н.К. Айдарбеков¹, А.В. Никонов², К.А. Кутербек¹, К.Ж. Бекмырза¹, А.М. Кабышев¹,
М. Кубенова¹

¹ Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

² Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук,

Екатеринбург, Россия

(E-mail: kbekmyrza@yandex.kz)

Синтез твердого электролита, совместимого с катодными материалами на основе двойных перовскитов для твердооксидных топливных элементов¹

Аннотация: в данной статье изучено влияние малых добавок оксидов переходных металлов (содопантов) на свойства твердого электролита GDC. Синтезированы образцы плотной керамики составов $\text{Ce}_{0,9(1-x)}\text{Gd}_{0,1(1-x)}\text{M}_x\text{O}_{2-\Delta}$ ($x = 0,01, 0,03, 0,05$; $\text{M} = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{Zn}$) спеканием компактов. Проведены дилатометрические исследования исходных порошков и определена оптимальная температура их спекания. Определено, что содопанты улучшают спекаемость GDC за счет того, что во время спекания образуют жидкую фазу, которая увеличивает скорость межчастичной диффузии. Проведено измерение проводимости синтезированных образцов. Определено влияние содопантов на фазовый состав образцов.

Ключевые слова: ТОТЭ, твердый электролит, ионная проводимость, фазовые переходы, содопанты.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-134-1-86-92>

Поступила: 22.01.2021 / Допущена к опубликованию: 03.03.2021

Введение. Установлено, что твердый электролит ZrO_2 , стабилизированный Sc_2O_3 (ScSZ), благодаря высокой кислород-ионной проводимости, является перспективным материалом для создания на его основе высокотемпературных ТОТЭ. Однако ScSZ имеет существенный недостаток – при рабочих условиях он взаимодействует с материалами катода и образует плохо проводящие фазы на границе катода и электролита. Предотвратить данное взаимодействие можно, создав на поверхности электролита ScSZ со стороны анода буферный слой электролита на основе CeO_2 .

Исходные материалы. В исследовании использовались два типа исходных порошков: коммерческий порошок электролита GDC (Kceracell Co., Ltd.) и порошок электролита ScSZ-n, полученный методом лазерного испарения [1]. Характеристики порошков представлены в таблице 1. Как видно, размер частиц порошка ScSZ-n, по данным BET анализа, почти в два раза меньше, чем размер частиц порошка GDC. Для того чтобы сблизить размеры частиц этих материалов, порошок ScSZ-n прокаливали при температуре 600 °С в течение 4 часов с последующим измельчением в агатовой ступке. Полученный в результате порошок обозначен как ScSZ-600, его характеристики также представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Номенклатура и характеристики исходных порошков

Обозначение	Химический состав	S_{BET} , м ² /г	d_{BET} , нм	$\gamma_{\text{теор}}$, г/см ³
GDC	$\text{Ce}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{O}_{2-\delta}$	34,2	24	7,21
ScSZ-n	$\text{Zr}_{0,81}\text{Sc}_{0,19}\text{O}_{1,905}$	81,5	13	5,67
ScSZ-600	$\text{Zr}_{0,81}\text{Sc}_{0,19}\text{O}_{1,905}$	54,9	19	5,67

¹ Данное исследование финансируется Комитетом Науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант №AP09261208 Разработка микротрубчатого твердооксидного топливного элемента с высокими удельными характеристиками)

На рисунке 1 приведены изображения исходных нанопорошков GDC и ScSZ-n, полученных с помощью сканирующего (LEO 982) и просвечивающего (Jeol Jem 2100) электронных микроскопов. Видно, что порошок ScSZ-n не агломерирован и его частицы имеют сферическую форму, в то время как наноразмерные частицы порошка GDC собраны в агломераты размерами порядка 0,2 мкм.

Экспериментальные результаты. Успешное совместное спекание двух разнородных слоев возможно при согласованной усадке в процессе спекания материалов, составляющих слой. Основные характеристики порошков, влияющих на кинетику спекания, - это гранулометрический и химический состав. Порошки, используемые в работе, являются наноразмерными. Однако, во-первых, известно, что GDC спекается хуже, чем ScSZ, и для получения высокоплотного слоя GDC необходимы высокие температуры порядка 1400-1600 °С [2, 3]. Во-вторых, используемый коммерческий порошок GDC агломерирован, что также приведет к затруднению его спекания.

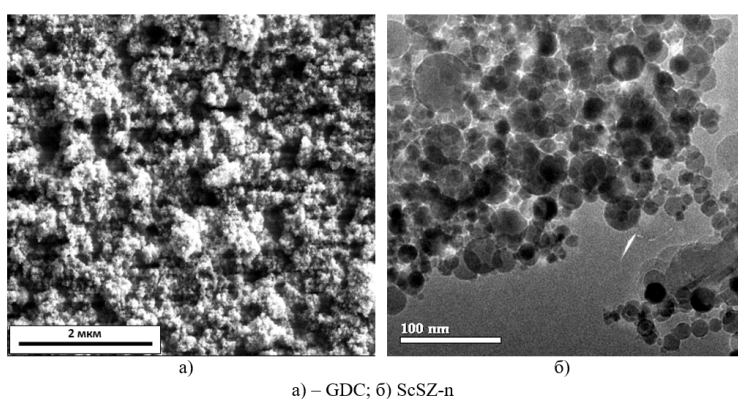


Рисунок 1 – Микрофотография порошков

Результаты дилатометрических исследований исходных порошков представлены на рисунке 2. Видно, что температура начала спекания порошков GDC почти на 100 °С выше по сравнению с температурой начала спекания порошков ScSZ. Кроме того, процессы спекания ScSZ-n и ScSZ-600 протекают быстрее и заканчиваются при ≈ 1150 °С и 1200 °С, тогда как спекание GDC продолжается вплоть до 1500 °С. Таким образом, вряд ли удастся осуществить совместное спекание двухслойных образцов, сформированных из исходных порошков.

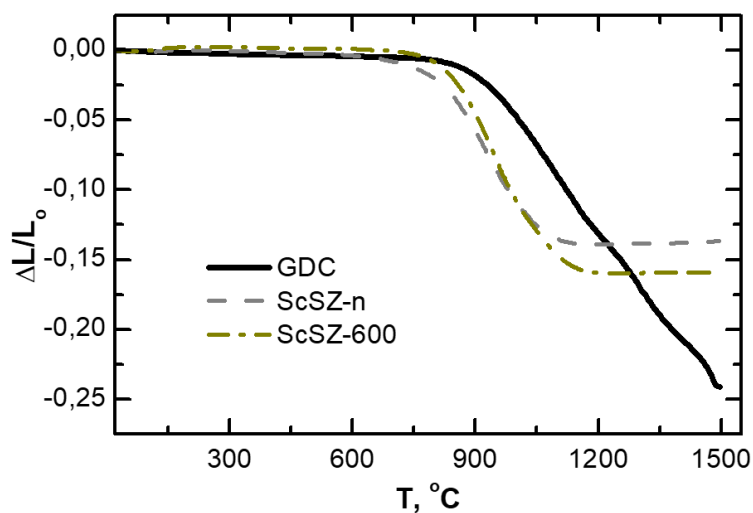


Рисунок 2 – Кривые линейной усадки исходных электролитных материалов GDC и ScSZ

В литературе показано, что кинетику спекания твердого электролита GDC можно существенно изменить путем введения в его состав второго допанта (содопанта) [4].

Следовательно, теоретически можно подобрать содопант, который «подгонит» кинетику спекания GDC к ScSZ для реализации совместного спекания.

Содопанты улучшают спекаемость GDC за счет того, что во время спекания образуют жидкую фазу, которая увеличивает скорость межчастичной диффузии.

Следовательно, вводимый допант должен сегрегироваться на границах зерен, а не растворяться в объеме зерна. В работе [5] предложен оценочный критерий растворимости допантов в решетке хозяина. Считается, что растворимость обратно пропорциональна квадрату «наклона Вегарда» (Vegard's Slope), который для CeO_2 равен:

$$X = 0,0022r_i + 0,00015z_i, \quad (1)$$

где r_i – разница между ионными радиусами допанта и Ce^{4+} (при координационном числе 8), z_i – разница между зарядами допанта и Ce^{4+} . Похожие выражения были найдены в работах [6, 7].

Таким образом, содопанты, не растворяющиеся в решетке GDC, должны характеризоваться $|X|$ значительно больше нуля. Однако если значение X очень большое, то возможно образование вторичной фазы, в которой GDC не растворяется, что не позволяет проходить спеканию по жидкофазному пути. В работе [8] одно из требований, предъявляемое к материалам для осуществления жидкофазного спекания, сформулировано следующим образом: твердая фаза должна растворяться в жидкой, чтобы мог происходить транспорт ионов. Кроме того, допанты с положительным X (то есть большого размера и/или электронодонорные) будут приводить к уменьшению концентрации кислородных вакансий вблизи границ зерен и, следовательно, к увеличению температуры спекания. Допанты же с отрицательным X (то есть малого размера и/или электроноакцепторные) будут способствовать спеканию.

В таблице 2 представлены значения наклона Вегарда X для ряда допантов. Исходя из этих данных и анализа литературы, в качестве содопантов для исследования были выбраны следующие элементы: Co, Cu, Mn и Zn.

Таблица 2 - Наклон Вегарда ряда допантов [9]

Элемент	r_i , Å	X (x 100000)
Si^{4+}	0,5	-95
Al^{3+}	0,69	-77
Ni^{2+}	0,83	-61
Ga^{3+}	0,77	-59
Mn^{3+}	0,78	-58
Fe^{3+}	0,78	-57
Cu^+	0,92	-56
Li^+	0,92	-56
Cu^{2+}	0,89**	-48
Mg^{2+}	0,89	-48
Co^{2+}	0,90	-45
Zn^{2+}	0,90	-45
Fe^{2+}	0,92	-41
Sc^{3+}	0,87	-37
Mn^{2+}	0,96	-32
Hf^{4+}	0,83	-31
Zr^{4+}	0,84	-29
In^{3+}	0,92	-26
Lu^{3+}	0,98	-13

Введение содопантов в электролит GDC. Методика введения содопантов в состав GDC включала в себя следующие стадии:

-Подготовка раствора нитрата содопанта;

- Диспергирование наноразмерного порошка GDC в изопропиловом спирте;
- Добавление к полученной суспензии требуемого количества водного раствора нитрата содопанта и перемешивание с помощью магнитной мешалки;
- Удаление растворителя в течение нескольких часов при постоянном перемешивании и нагреве до 60°C ;
- Сушка при 120°C в течение не менее 2 часов (разложение нитратных солей происходило при спекании керамики);
- Измельчение полученных порошков в агатовой ступке.

В качестве исходных реагентов для подготовки растворов нитратов использовали соли $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ (о.ч.), $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (о.ч.), $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ (х.ч.) (FlukaAnalytical) и $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ (о.ч.), которые растворяли в дистиллированной воде. Концентрация раствора рассчитывалась из массы соли и объема взятой для растворения воды.

Каждый содопант использовался для изготовления трех составов, отличающихся количеством введенного содопанта: 1, 3 и 5 мол.%. При этом количество вводимого содопанта вычислялось исходя из предположений, что содопант в равной степени заменит Ce и Gd, без восстановления Ce до степени окисления 3+, а изменение заряда компенсируется за счет изменения количества кислорода. Например, состав, в котором предполагалось содержание 3 мол.% Mn определялся как $\text{Mn}_{0,03}\text{Ce}_{0,873}\text{Gd}_{0,097}\text{O}_{1,922}$, а состав с 1 мол.% Cu – $\text{Cu}_{0,01}\text{Ce}_{0,891}\text{Gd}_{0,099}\text{O}_{1,941}$. Далее, для простоты, составы с содопантами будем обозначать как GDC-хМ, где х – количество введенного содопанта в мол.% (1, 3 или 5), а М – содопант (Co, Cu, Mn или Zn).

Методы исследования. Из приготовленных по описанной выше методике порошков были сформированы два типа образцов: 1) для исследования кинетики спекания; 2) для исследования проводимости. В обоих случаях для прессования образцов использовался одноосный гидростатический пресс ПГ30 УХЛ4.

Образцы для дилатометрических исследований представляли собой диски диаметром 8 мм и толщиной 2 мм, спрессованные до относительной плотности $\approx 0,5$. Кинетику спекания исследовали в воздушной атмосфере в диапазоне температур $20\text{-}1500^{\circ}\text{C}$ с помощью дилатометра Dil 402С.

Для измерения проводимости образцы прессовали в виде брусков прямоугольного сечения, $3 \times 2 \times 30$ мм, до относительной плотности 0,6. Для этого подбирали массу засыпки и давление прессования. Полученные прессовки спекали в воздушной атмосфере. Температуры спекания образцов были определены из дилатометрических данных. Составы, содержащие Co и Mn, спекали при 1150°C , а для составов с Zn и Cu – при 1250°C и 1050°C соответственно. Выдержка во всех случаях составляла 4 часа. На спеченные образцы наносили зонды из платиновой проволоки диаметром 0,2 мм. Измерения проводимости проводили 4-х зондовым методом на постоянном токе в диапазоне температур $600\text{-}900^{\circ}\text{C}$ с помощью автоматической системы сбора информации на основе контроллера ADAM-5000.

Плотности всех образцов определяли методом гидростатического взвешивания. После дилатометрических исследований на образцах, содержащих 5 мол.% содопантов, был определен фазовый состав. Дифрактограммы снимались на дифрактометре D8 DISCOVER на медном излучении ($\text{Cu K}\alpha 1,2 \lambda = 1,542\text{\AA}$) с графитовым монохроматором на дифрагированном луче. Обработка выполнена с использованием программы TOPAS 3 с ритвельдовским алгоритмом уточнения структурных параметров. При оценке среднего размера кристаллитов (ОКР) использовался коэффициент коррекции К (в формуле Шерера) = 0,89.

Влияние содопантов на характеристики GDC. Влияние содопантов на фазовый состав. Результаты анализа структуры образцов GDC-5М (М = Co, Cu, Mn, Zn) после спекания дилатометра представлены на рисунке 3 и в таблице 3. Видно, что материал всех образцов содержит одну кристаллическую фазу – твердый раствор на основе кубической формы CeO_2 (Serianite) с параметром кубической решетки $0,5422 \pm 0,0003$ нм. На дифрактограммах составов, содержащих Co и Zn, наблюдается затягивание линий в сторону малых углов, что возможно обусловлено неоднородностью состава. Для этих образцов значение ОКР вероятно занижено.

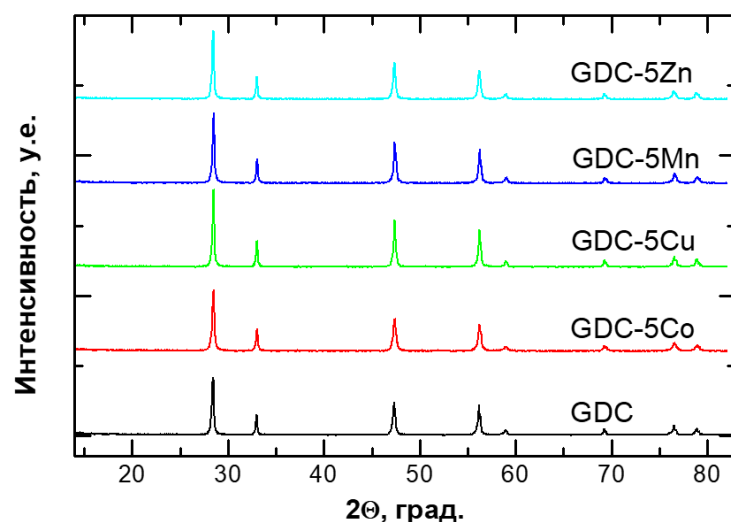


Рисунок 3 – Дифрактограммы образцов GDC с добавками 5 мол.% М (М = Co, Cu, Mn, Zn)

Таблица 3 - Структурные характеристики керамики на основе GDC

Обозначение	$T_{\text{спек}}$, °C	$C_{\text{куб.}}$, %	ОКР, нм	a , нм	γ_m , г/см ³	γ_{XRD} , г/см ³	γ_{calc} , г/см ³
GDC	1500	100	52(3)	0,5422(3)	7,08	7,21	7,21
GDC-5Co	1115	100	47(2)	0,5422(3)	6,70	7,00	7,19
GDC-5Cu	1150	100	54(3)	0,5421(3)	6,69	7,01	7,19
GDC-5Mn	1150	100	48(2)	0,5420(3)	6,87	7,02	7,15
GDC-5Zn	1150	100	52(3)	0,5422(3)	6,63	7,02	7,16

Из таблицы 3 видно, что параметр решетки всех материалов в пределах ошибки совпадает. Какие-либо вторичные фазы также обнаружены не были. Поэтому оценить степень растворения содопантов в матрице диоксида церия затруднительно. С одной стороны, большинство содопантов характеризуются радиусами ионов, близкими к радиусу Ce^{4+} (таблица 4), и вхождение их в твердый раствор не должно значительно изменить параметр решетки. С другой стороны, возможно, что содопанты в виде наноразмерных включений распределены по границам зерен (в силу методики их введения) и из-за их малости не фиксируются на дифрактограммах.

Таблица 4 - Характеристики ионов

Элемент	$r_{\text{ион}}$, нм	χ
Ce^{4+}	0,097	1,12
Gd^{3+}	0,105	1,20
Co^{2+}	0,090	1,88
Cu^{2+}	0,073***	1,90
Mn^{2+}	0,096	1,55
Zn^{2+}	0,090	1,65

Кроме того, эмпирическое правило Гольдшмидта утверждает, что значительная растворимость ионов какого-либо вещества (допант) в решетке другого вещества (хозяин) будет наблюдаться, если 1) ионный радиус хозяина и допанта различаются не более чем на 15% и 2) электроотрицательность хозяина и допанта различаются не более чем на 0,4 [10]. Следовательно, для хорошей растворимости в решетке CeO_2 ион допанта должен иметь ионный радиус в диапазоне 0,082 - 0,112 нм и электроотрицательность 0,72 - 1,52. Как видно из таблицы 19, этим двум условиям удовлетворяет основной допант Gd^{3+} . Близкими значениями к указанным диапазонам характеризуется и Mn^{2+} . Co^{2+} и Zn^{2+} хоть и обладают ионными радиусами, подходящими для вхождения в решетку, однако их электроотрицательность не

укладывается в представленный диапазон. Оба параметра иона Cu^{2+} не соответствуют правилу Гольдшмидта, что указывает на плохую растворимость меди в CeO_2 .

Так как рентгенофазовый анализ был выполнен на составах с наибольшим содержанием легирующей добавки считаем, что введение 1 и 3 мол.% содопантов также не должно влиять на структуру GDC.

Заключение. Исследовано влияние малых добавок оксидов переходных металлов (содопантов) на свойства твердого электролита $\text{Ce}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{O}_{2-\delta}$ (GDC). Синтезированы образцы плотной керамики составов $\text{Ce}_{0,9(1-x)}\text{Gd}_{0,1(1-x)}\text{M}_x\text{O}_{2-\Delta}$ ($x = 0,01, 0,03, 0,05$; $\text{M} = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{Zn}$) спеканием компактов при температуре $1050-1250^\circ\text{C}$ в зависимости от типа добавки. Размер зерен в синтезированных образцах составлял около 50 нм.

Введение любого из исследованных содопантов приводит к интенсификации спекания GDC. Причем температура конца усадки уменьшается в ряду содопантов $\text{Zn} \rightarrow \text{Mn} \rightarrow \text{Co} \rightarrow \text{Cu}$, т.е. состав, содержащий медь, характеризуется наименьшей температурой конца усадки.

Введение Co и Cu в состав GDC увеличивает общую проводимость, в то время как введение Zn приводит к значительному снижению проводимости. Небольшая добавка Mn (1, 3 мол.%) практически не сказывается на уровне проводимости, тогда как 5 мол.% Mn существенно ухудшают проводимость.

Список литературы

- 1 Kotov Yu.A., Osipov V.V., Samatov O.M., Ivanov M.G., Platonov V.V., Murzakev A.M., Azarkevich E.I., Medvedev A.I., Shtolts A.K., Timoshenkova O.R. Properties of powders produced by evaporating $\text{CeO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ targets exposed to pulsed-periodic radiation of a CO_2 laser // Technical Physics. – 2004. – Vol. 49. – P. 352.
- 2 Van herle J., Horita T., Kawada T., Sakai N., Yokokawa H., Dokiya M. Low temperature fabrication of (Y,Gd,Sm)-doped ceria electrolyte // Solid State Ionics 86-88. – 1996. – P. 1255-1258.
- 3 Liu Z., Mingfei L., Lifang N., Meilin L. Fabrication and characterization of functionally-graded LSCF cathodes by tape casting // Int. J. Hydrog. Energy. – 2013. – Vol. 38. – P. 1082-1087.
- 4 Kleinogel C., Gauckler L.J. Sintering of Nanocrystalline CeO_2 Ceramics // Adv. Mater. 13-14. – 2001. – P. 1081.
- 5 Kim D.-J. Lattice Parameters, Ionic Conductivities, and Solubility Limits in Fluorite-Structure MO_2 Oxide [$\text{M} = \text{Hf}^{4+}, \text{Zr}^{4+}, \text{Ce}^{4+}, \text{Th}^{4+}, \text{U}^{4+}$] Solid Solutions // Journal of the American Ceramic Society. – 1989. – Vol. 72. – P. 1415.
- 6 Hong S.J., Virkar A.V. Lattice Parameters and Densities of Rare Earth Oxide Doped Ceria Electrolytes // Journal of the American Ceramic Society. 1995. – Vol. 78. – P. 433.
- 7 Ranlov J., Poulsen F.W., Mogensen M. Comment on “The characterization of doped CeO_2 electrodes in solid oxide fuel cells” by B.G. Pound. // Solid State Ionics. – 1993. – Vol. 61. – P. 277.
- 8 Kingery W.D. Densification during Sintering in the Presence of a Liquid Phase. I.Theory // Journal of Applied Physics. – 1959. – Vol. 30. – P. 301.
- 9 Nicholas J.D., De Jonghe L.C. Prediction and evaluation of sintering aids for Cerium Gadolinium Oxide // Solid State Ionics. – 2007. – Vol. 178. – P. 1187.
- 10 Урусов В.С. Теория изоморфной смесимости. - Москва: Наука, 1977. – 251 с.

Н.К. Айдарбеков¹, А.В. Никонов², К.А. Кутербеков¹, К.Ж. Бекмырза¹, А.М. Кабышев¹, М. Кубенова¹

¹ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

² Ресей Ғылым Академиясы Орал бөлімшесінің электрофизика институты, Екатеринбург, Ресей

Қатты оксидті отын элементтеріне арналған қос перовскитке негізделген катодты материалдармен үйлесімді қатты электролиттің синтезі

Аннотация. Бұл мақалада GDC қатты электролитінің қасиеттеріне өтпелі металл оксидтерінің (содопанттардың) шағын қоспаларының әсері қарастырылған. $\text{Ce}_{0,9(1-x)}\text{Gd}_{0,1(1-x)}\text{M}_x\text{O}_{2-\Delta}$ ($x = 0,01, 0,03, 0,05$; $\text{M} = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{Zn}$) тығыз керамика үлгілерінің құрамы компакттерді пісіру арқылы синтезделді. Бастапқы ұнтақтарға дилатометриялық зерттеулер жүргізілді және олардың сіңуінің оңтайлы температурасы анықталды. Содопанттар GDC-нің спекуляциясын жақсартады, өйткені агломерация кезінде сұйық фаза пайда болады, бұл бөлшектер арасындағы диффузия жылдамдығын арттырады. Синтезделген үлгілердің Өткізгіштігін өлшеу жүргізілді. Үлгілердің фазалық құрамына содопанттардың әсері анықталды.

Түйін сөздер: CeO_2 , қатты электролит, иондық өткізгіштік, фазалық ауысулар, содопанттар.

N.K. Aidarbekov¹, A.V. Nikonov², K.A. Kuterbekov¹, K.Zh. Bekmyrza¹, A.M. Kabyshev¹, M. Kubenova¹

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

² The Institute of Electrophysics of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Synthesis of solid electrolyte compatible with cathode materials based on double perovskites for solid oxide fuel cells

Abstract. This paper studies the effect of small additives of transition metal oxides (sodopants) on the properties of the solid electrolyte GDC. Samples of dense ceramics of compositions $\text{Ce}_{0,9(1-x)}\text{Gd}_{0,1(1-x)}\text{M}_x\text{O}_{2-\Delta}$ ($x = 0,01, 0,03, 0,05$; $\text{M} = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{Zn}$) have been synthesized by sintering compacts. The authors have carried out dilatometric studies of the initial powders and determined the optimal sintering temperature. It has been determined that sodopants improve the GDC sintering ability because during sintering they form a liquid phase, which increases the rate of interparticle diffusion. As part of the study there has been measured the conductivity of the synthesized samples. The article considers influence of sodopants on the phase composition of the samples.

Keywords: SOFC, solid electrolyte, ionic conductivity, phase transitions, sodopants.

References

- 1 Kotov Yu.A., Osipov V.V., Samatov O.M., Ivanov M.G., Platonov V.V., Murzakev A.M., Azarkevich E.I., Medvedev A.I., Shtolts A.K., Timoshenkova O.R. Properties of powders produced by evaporating $\text{CeO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ targets exposed to pulsed-periodic radiation of a CO_2 laser, *Technical Physics*, 49, 352 (2004).
- 2 Van herle J., Horita T., Kawada T., Sakai N., Yokokawa H., Dokiya M. Low temperature fabrication of (Y,Gd,Sm)-doped ceria electrolyte, *Solid State Ionics* 86-88, 1255-1258 (1996).
- 3 Liu Z., Mingfei L., Lifang N., Meilin L. Fabrication and characterization of functionally-graded LSCF cathodes by tape casting, *Int. J. Hydrog. Energy*, 38, 1082-1087 (2013).
- 4 Kleinlogel C., Gauckler L.J. Sintering of Nanocrystalline CeO_2 Ceramics, *Adv. Mater.*, 13-14, 1081 (2001).
- 5 Kim D.-J. Lattice Parameters, Ionic Conductivities, and Solubility Limits in Fluorite-Structure MO_2 Oxide [M = Hf^{4+} , Zr^{4+} , Ce^{4+} , Th^{4+} , U^{4+}] Solid Solutions, *Journal of the American Ceramic Society*, 72, 1415 (1989).
- 6 Hong S.J., Virkar A.V. Lattice Parameters and Densities of Rare Earth Oxide Doped Ceria Electrolytes, *Journal of the American Ceramic Society*, 78, 433 (1995).
- 7 Ranlov J., Poulsen F.W., Mogensen M. Comment on "The characterization of doped CeO_2 electrodes in solid oxide fuel cells" by B.G. Pound, *Solid State Ionics*, 61, 277 (1993).
- 8 Kingery W.D. Densification during Sintering in the Presence of a Liquid Phase. I. Theory, *Journal of Applied Physics*, 30, 301 (1959).
- 9 Nicholas J.D., De Jonghe L.C. Prediction and evaluation of sintering aids for Cerium Gadolinium Oxide, *Solid State Ionics*, 178, 1187 (2007).
- 10 Urusov V.S. Teorya izomorfnoi smesimosti [Isomorphic miscibility theory] (Moscow: Nauka, 1977, 251 p.). [in Russian]

Сведения об авторах:

Айдәрбеков Н.К. - **основной автор**, докторант 3 курса по специальности «6D060500 - Ядерная физика», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Никонов А.В. - кандидат технических наук, Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.

Кутербек К.А. - доктор физико-математических наук, профессор Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Бекмырза К.Ж. - PhD, и. о. доцента кафедры технической физики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Кабышев А.М. - PhD, старший преподаватель Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Кубенова М. - научный сотрудник научно-исследовательского института «Евразийский институт физико-энергетических исследований и наукоемких технологий», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Aidarbekov N.K. - **The main author**, The 3rd year doctoral student in the specialty 6D060500-Nuclear Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Nikonov A.V. - candidate of technical sciences, The Institute of Electrophysics of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

Kuterbekov K.A. - Doctor of physical and mathematical sciences, professor of the International Department of Nuclear Physics, new materials and technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Bekmyrza K.Zh. - Ph.D, Associate Professor of the Department of Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Kabyshev A.M. - Ph.D, Senior Lecturer of the International Department of Nuclear Physics, new materials and technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Kubenova M. - Researcher of the Research Institute "Eurasian physics and energy research and high-tech technologies", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.