

ТВЕРДОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ КЕРАМИКИ (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃ СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА

*В.Е. Живулин^{1,2}, А.Ю. Стариков¹, С.А. Гудкова^{1,3}, Е.А. Трофимов^{1,4},
А.Ю. Пунда¹, А.В. Гауриляк¹, С.В. Павлов¹, О.В. Зайцева¹,
С.Н. Веселков¹, Д.А. Жеребцов¹, Т.В. Мосунова¹, Д.А. Винник¹*

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Челябинск, Россия

³ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

⁴ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Россия

В данной работе представлены результаты получения и исследования многокомпонентной керамики со структурой перовскита, состав которой отражает формула (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃. Образцы были получены методом твердофазного синтеза. Исходные компоненты шихты – порошки BaCO₃, Nb₂O₅, Al₂O₃, SrCO₃, CaCO₃, MgO, PbO, TiO₂. Смесь порошков перетирала при помощи шаровой мельницы для получения однородной смеси. Готовые составы порошков компактировали в форму цилиндров. Процесс прессования проводили с использованием металлической пресс-формы и гидравлического пресса. Спекание осуществляли на платиновой подложке в трубчатой печи с карбидкремневыми нагревателями при температуре 1350 °С в течение 5 часов.

После спекания образцы измельчали до состояния порошка для дальнейшего изучения их структуры и химического состава. Исследование химического состава полученных образцов было проведено с помощью сканирующего микроскопа JEOL JSM 7001F, оснащенного энергодисперсионным рентгенфлуоресцентным анализатором INCA X-max 80 (Oxford Instruments). Исследование структуры проводили на порошковом дифрактометре Rigaku Ultima IV методом рентгеновского фазового анализа. Результаты электронно-микроскопического исследования показывали, что в составе изученных образцов присутствует большое количество кристаллов кубической формы, состав которых имеет структуру перовскита с формулой (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb)(Al,Ti,Nb)O₃. Наряду с этим в составе образцов присутствуют и кристаллы другого состава и формы.

Рентгенофазовое изучение образцов подтверждает такой вывод. В исследованных образцах присутствует большое количество вещества со структурой перовскита (наиболее близкими к этой фазе чистыми образцами из базы данных являются CaTiO₃, SrTiO₃). Наряду с этим в составе изученных образцов в значительных количествах присутствуют ниобаты и ниобаты-титанаты щелочноземельных металлов.

Дальнейшие исследования в этом направлении должны позволить получить монофазные образцы такого рода вещества, пригодные для изучения его электромагнитных характеристик.

Ключевые слова: многокомпонентная керамика, высокоэнтропийные оксиды, твердофазный синтез, перовскит.

Введение

В последние годы интерес исследователей привлекают вопросы получения и изучения свойств неметаллических высокоэнтропийных систем [1]. В рамках работ [2–4] были получены высокоэнтропийные оксиды (ВЭО) со структурой перовскита, а авторы работы [5] сообщают о создании монокристаллического ВЭО со структурой перовскита в форме эпитаксиальной плёнки.

Проводимая нами работа посвящена изучению возможности получения ВЭО со структурой перовскита. Такие ВЭО могут представлять интерес для исследования, поскольку вещества с такой структурой часто проявляют полезные свойства. Показано, что ряд таких веществ обладает полезными магнитными свойствами [6], другие способны участвовать в процессах преобразования и хранения энергии [7, 8], некоторые проявляют сверхпроводимость [9], сегнетоэлектрические свойства [10–12] и др.

Малое количество исследований пятикомпонентных или более сложных перовскитов обусловлено сложностями в стабилизации гомогенных монокристаллов. Обычно увеличение числа компонентов приводит к появлению нескольких фаз или интерметаллических структур. Множество ВЭО с простой кубической решёткой были получены в большом количестве в виде керамики [13–19]. Опираясь на результаты этих исследований, можно считать, что благодаря высокой конфигурационной энтропии смешения компонентов в оксидных системах может быть очень эффективна стабилизация твердого раствора [20, 21].

В настоящей работе представлены результаты получения и исследования многокомпонентной керамики, в состав которой входит многокомпонентная (высокоэнтропийная) фаза со структурой перовскита, состав которой может быть описан с формулой (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃.

Экспериментальная часть

Для твердофазного синтеза образцов высокоэнтропийной керамики исходными компонентами шихты являлись BaCO₃, SrCO₃, MgO, PbO, CaCO₃, Nb₂O₅, Al₂O₃, TiO₂ чистотой не ниже ч.д.а. Состав образцов был подобран, опираясь на данные ряда предшествующих экспериментов. Исходные компоненты смешивали в необходимых пропорциях (табл. 1). Затем готовую шихту перетирали в течение 2 ч, используя шаровую мельницу. Порошки визуальнo однородной массы прессовали в таблетки с помощью металлической пресс-формы (с внутренним диаметром 12 мм) и гидравлического пресса при усилии равном 10 т.

Таблица 1

Состав исходных смесей (массы компонентов в граммах)
для изготовления образцов (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃

Номер образца	MgO	CaCO ₃	BaCO ₃	SrCO ₃	PbO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Nb ₂ O ₅
1	0,1654	1,4353	0,9799	2,4589	0,7937	0,2160	2,0373	1,9134
2	0,2810	1,5063	1,0743	1,9159	0,4101	0,6651	2,4637	1,6836
3	0,2070	1,1487	1,7230	2,2167	0,5309	0,3605	1,6702	2,1430

Образцы спекали в течение 5 часов при температуре 1350 °С на платиновой подложке, помещенной в трубчатую печь с карбидокремневыми нагревателями. Внутренний диаметр печи равен 50 мм, длина изотермической зоны составляет 80 мм. Печь оборудована высокоточным регулятором температуры.

Для исследования структуры полученных образцов методом рентгеновского фазового анализа использовали дифрактометр Rigaku Ultima IV. Образцы предварительно перетирали. Диапазон регистрации рентгенограмм углов 2θ от 15 до 65 град. с шагом 0,02 град. и скоростью съемки 2 град./мин.

Химический состав образцов изучали посредством микроскопа JEOL JSM 7001F с энергодисперсионным рентгенфлуоресцентным анализатором INCA X-max 80 (Oxford Instruments).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1–3 представлены полученные с помощью электронного микроскопа изображения микроструктуры образцов, показаны некоторые участки, состав которых определялся методом РСМА. Данные о составах этих участков (в ат. % от общего количества атомов металла) представлены в табл. 2.

Также в табл. 2 приведены рассчитанные по представленным данным значения конфигурационной энтропии смешения для данных участков, для расчёта которых в этом случае использована формула:

$$\Delta S_{\text{conf}} = - \sum_j (x_i^M \ln x_i^M) \times R,$$

где x_i^M – доля атомов металла в общем числе атомов металлов. Корректность использования данной формулы в случае, когда предполагается получение сложного оксида, может быть предметом дискуссий. Однако мы считаем, что для оценки в первом приближении в данном случае её можно использовать.

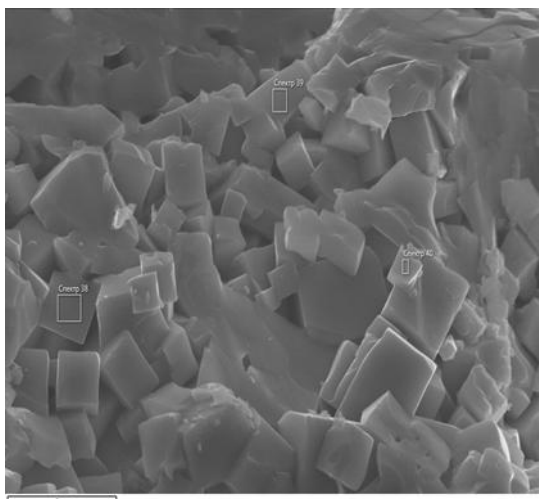


Рис. 1. Кубические микрокристаллы в составе образца № 1

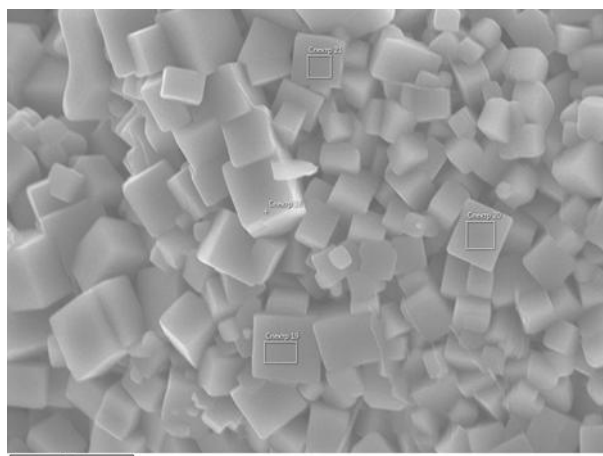
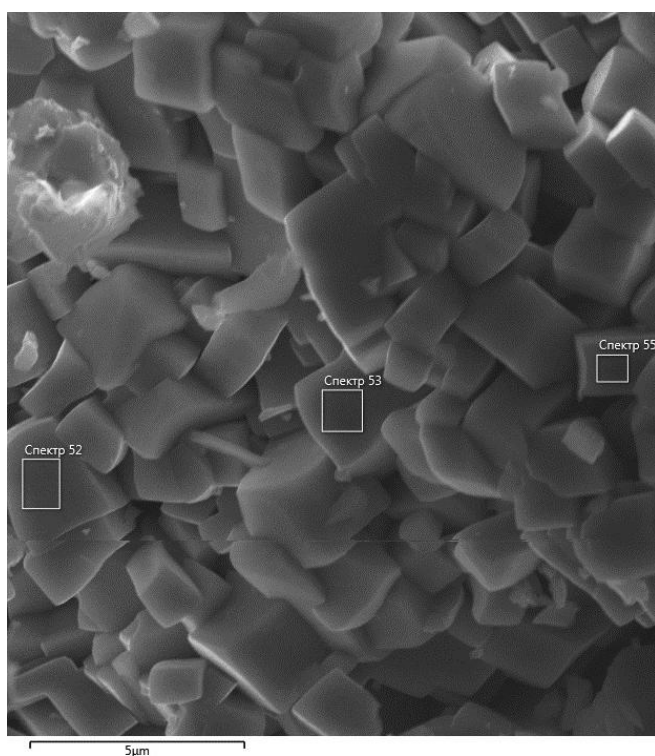
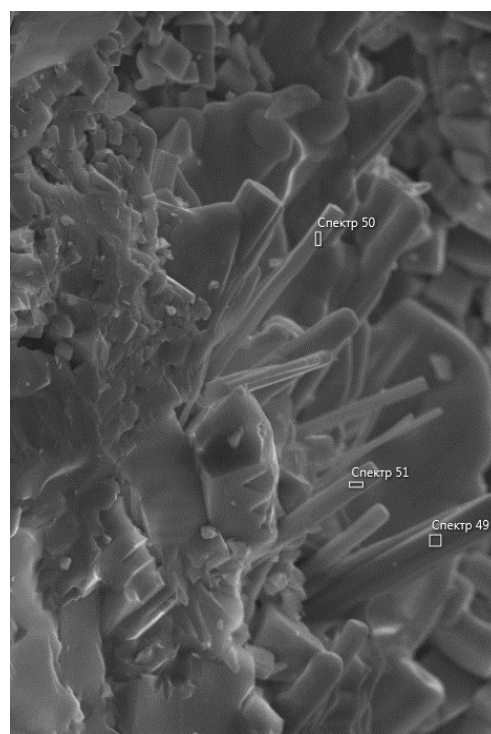


Рис. 2. Кубические микрокристаллы в составе образца № 2



а)



б)

Рис. 3. Микрокристаллы в составе образца № 3:
а – кристаллы со структурой перовскита (предположительно); б – другие кристаллы

Результаты электронно-микроскопического исследования показывают, что в составе изученных образцов присутствует большое количество кристаллов кубической формы (рис. 1, 2, 3а), состав которых не исключает того, что их основа имеет структуру перовскита с формулой $(\text{Mg,Ca,Ba,Sr,Pb})(\text{Al,Ti,Nb})\text{O}_3$. Наряду с этим в составе образцов присутствуют и кристаллы другого состава и формы. Пример таких кристаллов показан на рис. 3б.

Рентгенофазовое изучение образцов подтверждает такой вывод. Согласно данным, представленным на рис. 4–6, в исследованных образцах присутствует большое количество вещества со структурой перовскита (наиболее близкими к этой фазе чистыми образцами из базы данных являются CaTiO_3 , SrTiO_3). Наряду с этим в составе изученных образцов в значительных количествах присутствуют ниобаты и ниобаты-титанаты щелочноземельных металлов.

Таблица 2

Составы фрагментов поверхностей кристаллов кубической формы по данным РСМА
(в ат. % от общего количества атомов металла)

№	Спектр	[Mg]	[Ca]	[Sr]	[Ba]	[Pb]	[Al]	[Ti]	[Nb]	ΔS_{conf}
1	Спектр 38	0,035	0,200	0,232	0,026	0,012	0,041	0,314	0,139	-1,697 R
	Спектр 39	0,040	0,196	0,239	0,029	0,014	0,043	0,288	0,152	-1,731 R
	Спектр 40	0,034	0,204	0,230	0,029	0,013	0,043	0,310	0,138	-1,707 R
2	Спектр 18	0,039	0,250	0,145	0,020	0,007	0,069	0,404	0,066	-1,596 R
	Спектр 19	0,036	0,246	0,140	0,023	0,009	0,060	0,425	0,061	-1,571 R
	Спектр 20	0,024	0,257	0,174	0,017	0,010	0,045	0,387	0,085	-1,577 R
	Спектр 21	0,021	0,267	0,110	0,026	0,007	0,054	0,462	0,052	-1,477 R
3	Спектр 52	0,027	0,109	0,148	0,037	0,012	0,357	0,170	0,139	-1,742 R
	Спектр 53	0,031	0,164	0,108	0,076	0,008	0,179	0,342	0,091	-1,775 R
	Спектр 55	0,043	0,180	0,237	0,055	0,007	0,057	0,264	0,156	-1,785 R

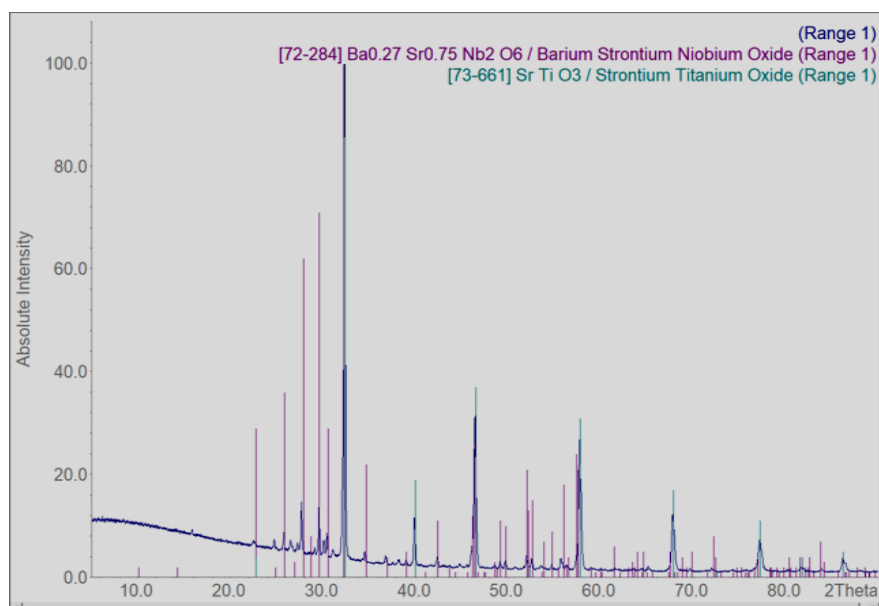


Рис. 4. Дифрактограмма образца № 1

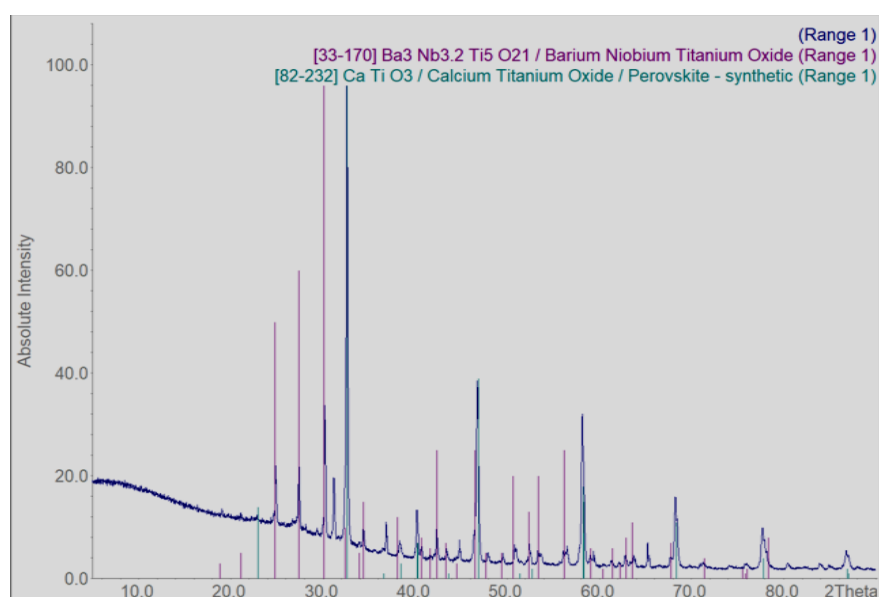


Рис. 5. Дифрактограмма образца № 2

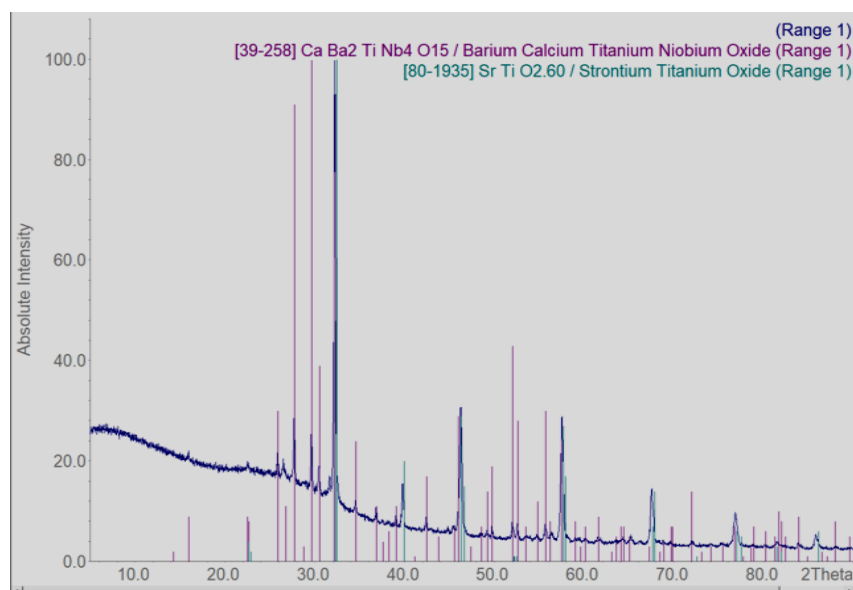


Рис. 6. Диффрактограмма образца № 3

Заключение

Исследование структуры и химического состава образцов оксидной системы $(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Pb}, \text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$, синтезированных методом твердофазного спекания, показало возможность получения многокомпонентного (возможно, высокоэнтропийного) вещества кристаллической структуры типа перовскита. Дальнейшие исследования в этом направлении должны позволить получить монофазные образцы такого рода вещества, пригодные для изучения его электромагнитных характеристик.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-73-10046).

Литература/References

1. Oses C., Toher C., Curtarolo S. High-Entropy Ceramics. *Nat. Rev. Mater.*, 2020, no. 5, pp. 295–309. DOI: 10.1038/s41578-019-0170-8.
2. Vinnik D.A., Trofimov E.A., Zhivulin V.E., Gudkova S.A., Zaitseva O.V., Zherebtsov D.A., Starikov A.Yu., Sherstyuk D.P., Amirov A.A., Kalgin A.V., Trukhanov S.V., Podgornov F.V. High Entropy Oxide Phases with Perovskite Structure. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 2. 268. DOI: 10.3390/nano10020268.
3. Sarkar A., Djenadic R., Wang D., Hein C., Kautenburger R., Clemens O., Hahn H. Rare Earth and Transition Metal Based Entropy Stabilised Perovskite Type Oxides. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, vol. 38, no. 5, pp. 2318–2327. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.058.
4. Jiang S., Hu T., Gild J., Zhou N., Nie J., Qin M., Harrington T., Vecchio K., Luo J. A New Class of High-Entropy Perovskite Oxides. *Scr. Mater.*, 2018, vol. 142, pp. 116–120. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.08.040.
5. Sharma Y., Musico B.L., Gao X., Hua C., May A.F., Herklotz A., Rastogi A., Mandrus D., Yan J., Lee H.N., Chisholm M. F., Keppens V., Ward T.Z. Single-Crystal High Entropy Perovskite Oxide Epitaxial Films. *Phys. Rev. Mater.*, 2018, vol. 2, no. 6. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.060404.
6. Pietosa J., Kolesnik S., Puzniak R., Wisniewski A., Poudel B., Dabrowski B. Magnetic Properties of $(\text{Nd}, \text{Ca})(\text{Ba}, \text{La})\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ Tuned by the Site-Selected Charge Doping, Oxygen Disorder, and Hydrostatic Pressure. *Phys. Rev. Mater.*, 2017, vol. 1, no. 6. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.064404
7. Zhu J., Li H., Zhong L., Xiao P., Xu X., Yang X., Zhao Z., Li J. Perovskite Oxides: Preparation, Characterizations, and Applications in Heterogeneous Catalysis. *ACS Catal.*, 2014, vol. 4, no. 9, pp. 2917–2940. DOI: 10.1021/cs500606g.

8. Kubicek M., Bork A.H., Rupp J.L.M. Perovskite Oxides – a Review on a Versatile Material Class for Solar-to-Fuel Conversion Processes. *J. Mater. Chem. A*, 2017, vol. 5, no. 24, pp. 11983–12000. DOI: 10.1039/C7TA00987A.
9. Bednorz J.G., Muller K.A. Perovskite-Type Oxides – The New Approach to High-Tc Superconductivity. *Rev. Mod. Phys.*, 1988, vol. 60, no. 3, pp. 585–600. DOI: 10.1103/RevModPhys.60.585.
10. Zhao H.J., Bellaiche L., Chen X.M., Iniguez J. Improper Electric Polarization in Simple Perovskite Oxides with Two Magnetic Sublattices. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8. DOI: 10.1038/ncomms14025.
11. Cohen R.E. Origin of Ferroelectricity in Perovskite Oxides. *Nature*, 1992, vol. 358, pp. 136–138. DOI: 10.1038/358136a0.
12. Weston L., Cui X.Y., Ringer S.P., Stampfl C. Multiferroic Crossover in Perovskite Oxides. *Phys. Rev. B*, 2016, vol. 93, no. 16. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.165210.
13. Rost C.M., Rak Z., Brenner D.W., Maria J.-P. Local Structure of the Mg_xNi_xCo_x-Cu_xZn_xO(x=0.2) Entropy-Stabilized Oxide: An EXAFS Study. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2017, vol. 100, no. 6, pp. 2732–2738. DOI: 10.1111/jace.14756.
14. Anand G., Wrynn A.P., Handley C.M., Freeman C.L. Phase Stability and Distortion in High-Entropy Oxides. *Acta Mater.*, 2018, vol. 146, pp. 119–125. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.12.037.
15. Berardan D., Meena A.K., Franger S., Herrero C., Dragoë N. Controlled Jahn-Teller Distortion in (MgCoNiCuZn)O-Based High Entropy Oxides. *J. Alloys Compd.*, 2017, vol. 704, pp. 693–700. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.02.070.
16. Lei Z., Liu X., Li R., Wang H., Wu Y., Lu Z. Ultrastable Metal Oxide Nanotube Arrays Achieved by Entropy-Stabilization Engineering. *Scr. Mater.*, 2018, vol. 146, pp. 340–343. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.12.025.
17. Sarkar A., Djenadic R., Usharani N. J., Sanghvi K.P., Chakravadhanula S.K., Gandhif A.S., Hahna H., Bhattacharya S.S. Nanocrystalline Multicomponent Entropy Stabilised Transition Metal Oxides. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 747–754. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.09.018.
18. Berardan D., Franger S., Meena A.K., Dragoë N. Room Temperature Lithium Superionic Conductivity in High Entropy Oxides. *J. Mater. Chem. A*, 2016, vol. 4, no. 24, pp. 9536–9541. DOI: 10.1039/C6TA03249D.
19. Dabrowa J., Stygar M., Mikula A., Knapik A., Mrocza K., Tejchman W., Danielewski M., Martin M. Synthesis and Microstructure of the (Co,Cr,Fe,Mn,Ni)₃O₄ High Entropy Oxide Characterized by Spinel Structure. *Mater. Lett.*, 2018, vol. 216, pp. 32–36. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.148.
20. Rost C.M., Sachet E., Borman T., Moballeghe A., Dickey E.C., Hou D., Jones J.L., Curtarolo S., Maria J.-P. Entropy-Stabilized Oxides. *Nat. Commun.*, 2015, vol. 6. DOI: 10.1038/ncomms9485.
21. Miracle D.B., Senkov O.N. A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts. *Acta Mater.*, 2017, vol. 122, pp. 448–511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.

Живулин Владимир Евгеньевич – соискатель, инженер лаборатории монокристаллов НОЦ, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76; Южно-Уральский гуманитарно-педагогический университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 69. E-mail: zhivulinve@mail.ru

Стариков Андрей Юрьевич – инженер-исследователь, студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: starikov-andrey@mail.ru

Гудкова Светлана Александровна – кандидат физико-математических наук, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76; Московский физико-технический институт, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9. E-mail: gudkovasa@susu.ru

Трофимов Евгений Алексеевич – профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76; Южно-Уральского государственного университета, филиал в г. Златоусте, 456217, г. Златоуст, ул. Тургенева, 16. E-mail: tea7510@gmail.com

Пунда Александр Юрьевич – студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: punda.s@mail.ru

Гавриляк Антон Валерьевич – студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: gavrilyak19@mail.ru

Павлов Сергей Владиславович – студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: spavlov112@gmail.ru

Зайцева Ольга Владимировна – аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: nikonovaolga90@gmail.com

Веселков Сергей Николаевич – аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: mesved123@yandex.ru

Жеребцов Дмитрий Анатольевич – доктор химических наук, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: zherebtsovda@susu.ru

Мосунова Татьяна Владимировна – кандидат химических наук, кафедра экологии химической технологии, химический факультет, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: mosunovatv@susu.ru

Винник Денис Александрович – доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: vinnikda@susu.ru.

Поступила в редакцию 7 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/chem200306

SOLID-PHASE SYNTHESIS OF MULTI-COMPONENT CERAMICS (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃ WITH PEROVSKITE STRUCTURE

V.E. Zhivulin^{1,2}, zhivulinve@mail.ru
A.Yu. Starikov¹, starikov-andrey@mail.ru
S.A. Gudkova^{1,3}, gudkovasa@susu.ru
E.A. Trofimov^{1,4}, tea7510@gmail.com
A.Yu. Punda¹, punda.s@mail.ru
A.V. Gavrilyak¹, gavrilyak19@mail.ru
S.V. Pavlov¹, spavlov112@gmail.ru
O.V. Zaitseva¹, nikonovaolga90@gmail.com
S.N. Veselkov¹, mesved123@yandex.ru
D.A. Zherebtsov¹, zherebtsovda@susu.ru
T.V. Mosunova¹, mosunovatv@susu.ru
D.A. Vinnik¹, vinnikda@susu.ru,

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russian Federation

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

⁴ South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation

This paper presents the results of the preparation and study of multi-component ceramics with the perovskite structure, the composition of which reflects the formula (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃. Samples were obtained by solid-phase synthesis. The initial components of the charge were powders of BaCO₃, Nb₂O₅, Al₂O₃, SrCO₃, CaCO₃, MgO, PbO, TiO₂. The powder mixture was ground by a ball mill to obtain a homogeneous mixture. The finished powder formulations were compacted into cylinder shapes. The pressing process was carried out with the use of a metal mold and a hydraulic press. Sintering was carried out on a platinum substrate in a tubular furnace with silicon carbide heaters at 1350 °C for 5 hours.

After sintering the samples were ground into powder to further study their structure and chemical composition. The chemical composition of the obtained samples was studied by a JEOL JSM 7001F scanning microscope equipped with an energy-dispersive X-ray fluorescence analyzer INCA X-max 80 (Oxford Instruments). The structure was studied on a Rigaku Ultima IV powder diffractometer by X-ray phase analysis. The results of electron microscopic investigation showed that the studied samples contained a large number of cubic crystals, which composition had the perovskite structure with the formula (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb)(Al,Ti,Nb)O₃. Besides, the composition of the samples contained crystals of different composition and shape.

The X-ray phase study of the samples confirms this conclusion. The studied samples contain a large amount of material with the perovskite structure (the pure samples from the database closest to this phase are CaTiO₃, SrTiO₃). Along with this, in the composition of the studied samples niobates and niobate-titanates of alkaline earth metals are present in significant quantities.

Further studies in this direction should make it possible to obtain monophasic samples of these kinds of substances suitable for studying their electromagnetic characteristics.

Keywords: multi-component ceramics, high-entropy oxides, solid-phase synthesis, perovskite.

Received 7 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Твердофазный синтез многокомпонентной керамики (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃ со структурой перовскита / В.Е. Живулин, А.Ю. Стариков, С.А. Гудкова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 108–115. DOI: 10.14529/chem200306

FOR CITATION

Zhivulin V.E., Starikov A.Yu., Gudkova S.A., Trofimov E.A., Punda A.Yu., Gavrilyak A.V., Pavlov S.V., Zaitseva O.V., Veselkov S.N., Zherebtsov D.A., Mosunova T.V., Vinnik D.A. Solid-Phase Synthesis of Multi-Component Ceramics (Mg,Ca,Ba,Sr,Pb,Al,Ti,Nb)O₃ with Perovskite Structure. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2020, vol. 12, no. 3, pp. 108–115. (in Russ.). DOI: 10.14529/chem200306