

# Экспериментальное получение поликомпонентных кристаллов со структурой гексаферрита М-типа

Зайцева О.В., Живулин Д.Е., Галкина Д.П.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация

[nikonovaolga90@gmail.com](mailto:nikonovaolga90@gmail.com), [zhivulin-74@mail.ru](mailto:zhivulin-74@mail.ru), [dashagalkinaa@gmail.com](mailto:dashagalkinaa@gmail.com)

**Аннотация.** Проведены работы по экспериментальному получению поликомпонентных кристаллов со структурой гексаферрита М-типа, качественный и количественный состав которых отражает формула  $AB_{12}O_{19}$ , где А – Ва, Pb, Sr, Ca, Zn, а В – Fe, Mn, Ni, Ti, Al, Cu, W. Материал такого состава в перспективе может предоставить возможность плавного изменения частоты ферромагнитного резонанса и пропускной способности. Таким образом могут быть получены свойства, которые требуются производителям электронного оборудования. В ходе проведенных исследований изучены возможности использования разных методик синтеза экспериментальных образцов – твердофазного спекания, выплавки в платиновом тигле и выплавки в тигле из нержавеющей стали. В результате электронно-микроскопического исследования и рентгеноспектрального микроанализа полученных образцов обнаружены два основных типа многокомпонентных кристаллических фаз – гексагональные кристаллы, имеющие структуру гексаферрита М-типа, и октаэдрические кристаллы, имеющие структуру шпинели  $AB_2O_4$ .

**Ключевые слова:** гексаферриты М-типа, многокомпонентные твёрдые растворы, высокоэнтропийные фазы, экспериментальные исследования.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка материалов на основе высокоэнтропийных кристаллических фаз – направление, которое активно развивается с начала XXI века [1, 2]. В большинстве случаев речь идёт о высокоэнтропийных металлических сплавах, т.е. сплавах, содержащих не менее пяти различных элементов, причём атомная концентрация каждого из них должна быть в пределах 5–35 %. В меньшей степени, чем металлическим, уделяется внимание изучению неметаллических высокоэнтропийных фаз [3-8]. В литературе представлены результаты исследований (преобладающее большинство которых опубликовано начиная с 2015 года), направленных на получение и изучение свойств оксидных высокоэнтропийных фаз, образованных простыми оксидами [9-18]. Однако существуют и работы, посвященные получению и исследованию высокоэнтропийных фаз с более сложной кристаллической структурой [19-22].

Цель проводимых нами работ – изучение возможности получения многокомпонентных (высокоэнтропийных) оксидных кристаллических фаз со структурой гексаферритов М-типа [23-25].

Как известно, гексаферриты М-типа благодаря своим физическим свойствам получили широкое распространение в различных отраслях науки и техники. Исследования последних десятилетий демонстрируют возможность управления свойствами гексаферритов посредством замещения части атомов железа другими атомами. В работах [26-30] показано, что гексаферриты М-типа благодаря наличию пяти различных кристаллографических позиций железа в их кристаллической решетке предоставляют для такого замещения широкие возможности.

Получение многокомпонентных твёрдых растворов со структурой гексаферрита М-типа с возможно более широкой областью гомогенности, включая твердые растворы, концентрация компонентов которых позволяет отнести их к высокоэнтропийным, позволит плавно изменять свойства изготовленного на основе такого вещества материала в зависимости от требований разработчиков технических устройств.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В рамках исследования была проведена серия экспериментов по получению высокоэнтропийных фаз со структурой гексаферритов, включающих выплавку и термообработку образцов различных систем, качественный и количественный состав которых отражает формула  $AB_{12}O_{19}$ , где А – Ва, Pb, Sr, Ca, Zn, а В – Fe, Mn, Ni, Ti, Al, Cu, W.

Согласно литературным данным, присутствие атомов некоторых из этих элементов в структуре гексаферрита, противоположным образом сказывается на магнитных и электрофизических свойствах кристаллов. Введение их в состав материала в перспективе может предоставить возможность плавного изменения частоты ферромагнитного резонанса и пропускной способности. Таким образом могут быть получены свойства, которые требуются производителям электронного оборудования. Состав шихты для приготовления экспериментальных образцов подбирался так, чтобы обеспечить максимум конфигурационной энтропии смешения.

В ходе проведенного исследования изучены возможности разных методик синтеза экспериментальных образцов – твердофазного спекания, выплавки в платиновом тигле и выплавки в тигле из нержавеющей стали.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00736. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2019), <https://rusmetalcon.susu.ru>

Твердофазное спекание осуществляли в окислительной атмосфере (на воздухе) в печи сопротивления при температурах порядка 1400 °С в течение 5 часов. По окончании термообработки образцы охлаждали и исследовали методами электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа (как и образцы, полученные в ходе последующих экспериментов).

В рамках проводимых работ полученные образцы исследовали, прежде всего, с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM7001F, снабжённого рентгеновским спектрометром Oxford INCA X-max 80 (для определения химического состава). В ряде случаев для подтверждения структуры образовавшихся фаз использован метод РФА (исследование проводилось на рентгеновском порошковом дифрактометре Rigaku Ultima IV).

В ходе изучения возможностей второго метода навеска тщательно перемешанной и измельчённой шихты нагревалась и выдерживалась 10 минут при температуре порядка 1500 °С в платиновом тигле, помещённом в алундовый тигель, в лабораторной индукционной печи УПИ-2.

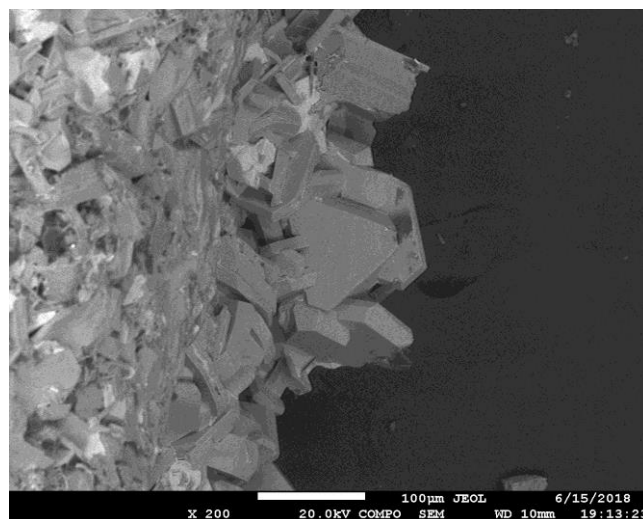
При проведении эксперимента третьим методом навеска тщательно перемешанной и измельчённой шихты плавилась в тигле из нержавеющей стали, который до верха был погружён в порошкообразный глинозём в алундовом тигле большего диаметра. Температура рабочего пространства индукционной печи в этом случае достигала величины порядка 1550 °С (температура, как и в предыдущих случаях, контролировалась лазерным пирометром). Вероятно, температура самого тигля была несколько ниже максимальной температуры в печи, поскольку тигель не расплавился. Время выдержки в печи составляло 10 минут. По окончании плавки тигель охлаждали. Затем тигель разрезали вдоль оси, и исследовали полученный срез.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

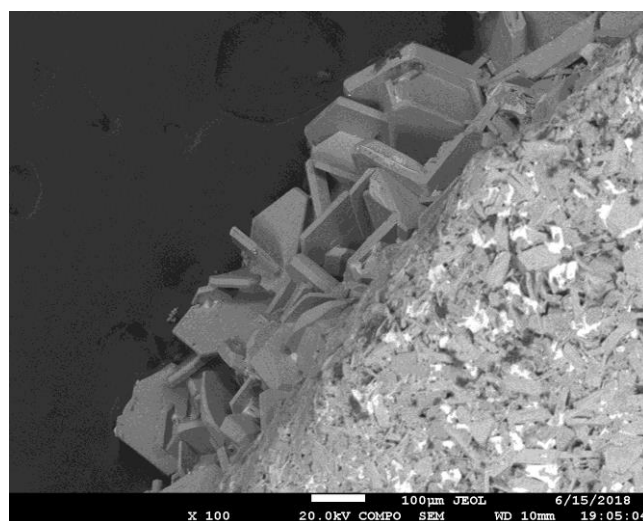
Доказано, что каждым из этих методов могут быть получены полизамещенные кристаллы, в том числе, имеющие структуру гексаферрита М-типа. Микрофотографии примеров гексагональных кристаллов со структурой гексаферрита М-типа, полученных в различных системах, представлены на рис. 1.

Следует отметить, что в исследуемых образцах, помимо гексагональных кристаллов, в больших или меньших количествах были обнаружены октаэдрические кристаллы (примеры которых представлены на рис. 2), вероятно, имеющие структуру шпинели  $AB_2O_4$ . В ряде образцов (в частности, в системах, состав которых изначально задавался как  $(Ba, Sr, Zn)(Fe, Al, Ti, Cu, Ni, W)_{12}O_{19}$ ,  $(Ba, Sr, Zn)(Fe, Al, Ti, Cu, Ni, Mn)_{12}O_{19}$ ) октаэдрические кристаллы преобладают.

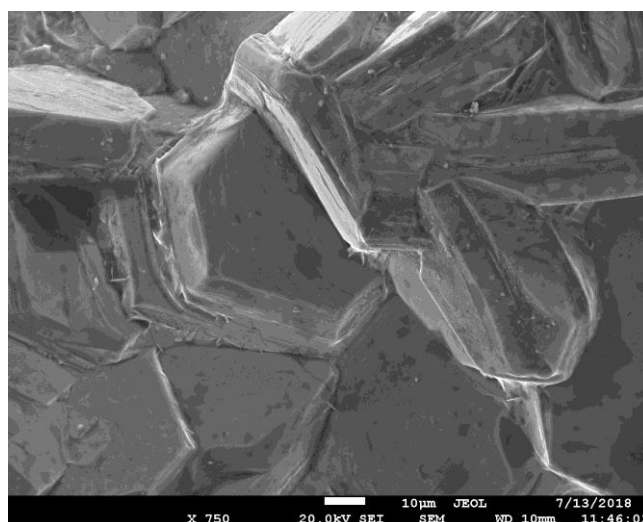
Согласно результатам исследований наиболее перспективными с точки зрения дальнейших работ являются системы, образованные следующими элементами – Ba, Sr, Ca, Zn в качестве элементов вида А и Fe, Mn, Ni, Ti, Al в качестве элементов вида В. Полученные данные демонстрируют, что преобладающая часть свинца в процессе получения образцов теряется (вероятно, испаряется), а вольфрам и медь плохо встраиваются в кристаллическую структуру гексаферрита М-типа.



a



b



c

Рис. 1. Микрофотографии гексагональных кристаллов, полученных:

a, б – твердофазным синтезом системы  $Ba(Fe, Mn, Ni, Ti, Al)_{12}O_{19}$ ; c – из расплава системы  $(Ba, Pb, Sr, Ca, Zn)Fe_{12}O_{19}$ , полученного выплавкой в платиновом тигле



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования продемонстрировано, что каждым из примененных методов – твердофазным спеканием, выплавкой в платиновом тигле и выплавкой в тигле из нержавеющей стали – в исследованных многокомпонентных оксидных системах могут быть получены многокомпонентные кристаллы, в том числе, имеющие структуру гексаферрита М-типа.

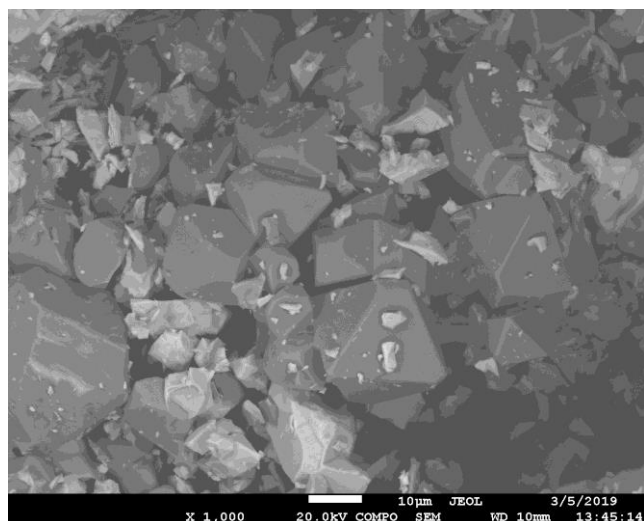
В рамках экспериментальной части работы получена информация, которая позволит на следующих этапах исследования, корректируя количественный состав выплавляемых образцов в направлении, позволяющем по возможности снизить количество образующихся низкоэнтропийных фаз, получить однородный твердый раствор.

Полученные экспериментальные данные в некоторой своей части можно рассматривать и как экспериментальные данные о равновесных фазовых составах в исследуемых системах, которые могут быть использованы для рационального выбора значений термодинамических функций, используемых в дальнейшем в процессе моделирования, и в то же время представляют особенный интерес с точки зрения образования кристаллов со структурой гексаферрита М-типа из оксидной шихты.

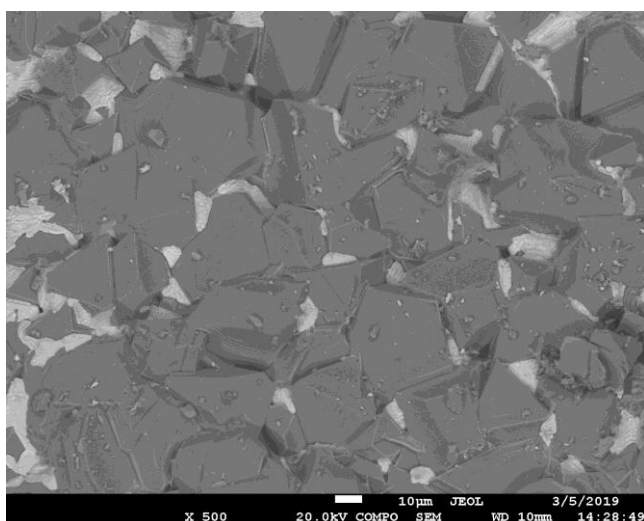
Опираясь на полученные данные, и учитывая всё перечисленное выше, следует считать возможным получение гексагональных поликомпонентных кристаллов (со структурой гексаферрита М-типа), включая кристаллы, стабилизации структуры которых способствуют высокие значения конфигурационной энтропии смешения компонентов кристаллической матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

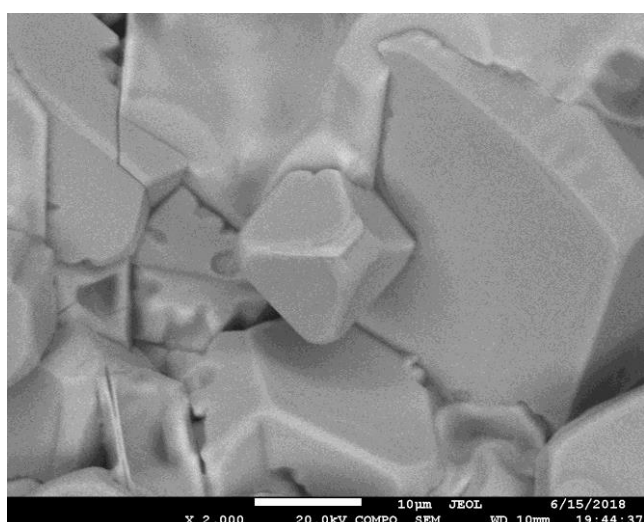
1. High-Entropy Alloys. Fundamentals and Applications / M.C. Gao, J.-W. Yeh, P.K. Liaw, Y. Zhang. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 524 p.
2. The Structure and Properties of High-entropy Alloys and Nitride Coatings Based on Them / A.D. Pogrebnyak, A.A. Bagdasaryan, I.V. Yakushchenko, V.M. Beresnev // Russian Chemical Reviews. – 2014. – Vol. 83, Is. 11. – P. 1027-1061. DOI: 10.1070/rcr4407
3. Entropy-stabilized Oxides / C.M. Rost, E. Sachet, T. Borman et. al. // Nature Communications. – 2015. – Vol. 6. – P. 84-85.
4. Formation Rules of Single Phase Solid Solution in High Entropy Alloys / L. Jiang, Y.P. Lu, H. Jiang et al. // Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 32, Is. 6. – P. 588-592. DOI: 10.1179/1743284715y.0000000130
5. Superior Oxidation Resistance of (Al<sub>0.34</sub>Cr<sub>0.22</sub>Nb<sub>0.11</sub>Si<sub>0.11</sub>Ti<sub>0.22</sub>)<sub>50</sub>N<sub>50</sub> High-Entropy Nitride / W.J. Shen, M.H. Tsai, K.Y. Tsai et al. // Journal of the Electrochemical Society. – 2013. – Vol. 160, Is. 11. – P. 531-535.
6. Ren B. Structure and Mechanical Properties of Multi-Element (AlCrMnMoNiZr)<sub>Nx</sub> Coatings by Reactive Magnetron Sputtering / B. Ren, Z. Shen, Z. Liu // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 560. – P. 171-176. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.01.148
7. Nano-Crystallization of High-Entropy Amorphous NbTiAlSiWxNy Films Prepared by Magnetron Sputtering / W. Sheng, X. Yang, C. Wang, Y. Zhang // Entropy. – 2016. – Vol. 18, Is. 6. – P. 226-231. DOI: 10.3390/e18060226



a



b



c

Рис. 2. Микрофотографии октаэдрических кристаллов, полученных твердофазным синтезом в системах:

- a – (Ba,Sr,Zn)(Fe,Al,Ti,Cu,Ni,W)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>;
- b – (Ba,Sr,Zn)(Fe,Al,Ti,Cu,Ni,Mn)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>;
- c – (Ba,Pb,Sr)(Fe,Mn,Ti,Ni,Al)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>

8. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics / J. Gild, Y. Zhang, T. Harrington et al. // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6, Is. 37946. – P. 1-10. DOI: 10.1038/srep37946
9. Evolution of Structure and Properties of Multi-Component (AlCrTaTiZr)O<sub>x</sub> Films / M.-I. Lin, M.-H. Tsai, W.-J. Shen, J.-W. Yeh // *Thin Solid Films*. – 2010. – Vol. 518, Is. 10. – P. 2732-2737. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.142
10. Entropy-Stabilized Oxides / C.M. Rost, E. Sacht, T. Borman et al. // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6, Is. 8485. – P. 1-8.
11. Colossal Dielectric Constant in High Entropy Oxides / D. Bérandan, S. Franger, D. Dragoé et al. // *Rapid Research Letters*. – 2016. – Vol.10, Is. 4. – P. 328-333. DOI: 10.1002/pssr.201600043
12. Nanocrystalline Multicomponent Entropy Stabilised Transition Metal Oxides / A. Sarkar, R. Djenadic, N.J. Usharani et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 37, Is. 2. – P. 747-754. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.09.018
13. Room Temperature Lithium Superionic Conductivity in High Entropy Oxides / D. Berardan, S. Franger, A.K. Meena, N. Dragoé // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2016. – Vol. 4, Is. 24. – P. 9536-9541. DOI: 10.1039/c6ta03249d
14. Charge Compensation and Electrostatic Transferability in Three Entropy-Stabilized Oxides: Results from Density Functional Theory Calculations / Zs. Rak, C.M. Rost, M. Lim et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – Vol. 120, Is. 095105. – P. 1-11. DOI: 10.1063/1.4962135
15. Local Structure of the Mg<sub>x</sub>Ni<sub>x</sub>Co<sub>x</sub>Cu<sub>x</sub>Zn<sub>x</sub>O(x=0.2) Entropy-Stabilized Oxide: An EXAFS Study / C.M. Rost, Z. Rak, D.W. Brenner, J.-P. Maria // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 100, Is. 6. – P. 2732-2738. DOI: 10.1111/jace.14756
16. Controlled Jahn-Teller Distortion in (MgCoNiCuZn)O-Based High Entropy Oxides / D. Berardan, A.K. Meena, S. Franger et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 704. – P. 693-700. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.02.070
17. Multicomponent Equiatomic Rare Earth Oxides with Narrow Band Gap and Associated Praseodymium Multivalency / A. Sarkar, C. Loho, L. Velasco et al. // *Dalton Transactions*. – 2017. – Vol. 46, Is. 36. – P. 12167-12176. DOI: 10.1039/c7dt02077e
18. Multicomponent Equiatomic Rare Earth Oxides / R. Djenadic, A. Sarkar, O. Clemens et al. // *Materials Research Letters*. – 2017. – Vol. 5, Is 2. – P. 102-109.
19. Ultrastable Metal Oxide Nanotube Arrays Achieved by Entropy-stabilization Engineering / Z. Lei, X. Liu, R. Li et al. // *Scripta Materialia*. – 2018. – Vol. 146. – P. 340-343. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.12.025
20. Tsau Ch.-H. The Microstructures and Electrical Resistivity of (Al, Cr, Ti)FeCoNiO<sub>x</sub> High-Entropy Alloy Oxide Thin Films / Ch.-H. Tsau, Zh.-Y. Hwang, S.-K. Chen // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1-6. DOI: 10.1155/2015/353140
21. Synthesis and Microstructure of the (Co,Cr,Fe,Mn,Ni)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> High Entropy Oxide Characterized by Spinel Structure / J. Dąbrowa, M. Stygar, A. Mikula et al. // *Materials Letters*. – 2018. – Vol. 216. – P. 32-36. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.148
22. A New Class of High-entropy Perovskite Oxides / S. Jiang, T. Hu, J. Gild et al. // *Scripta Materialia*. – 2018. – Vol. 142. – P. 116-120. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.08.040
23. Rare Earth and Transition Metal Based Entropy Stabilized Perovskite Type Oxides / A. Sarkar, R. Djenadic, D.Wang et al. // *Journal of the European Ceramic Societ.* – 2018. – Vol. 38, Is. 5. – P. 2318-2327. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.058
24. Zaitseva O.V. The Poly-Substituted M-Type Hexaferrite Crystals Growth / O.V. Zaitseva, D.A. Vinnik, E.A. Trofimov // *Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 946. – P. 186-191. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.946.186
25. Галкина Д.П. Термодинамическая модель для описания полизамещенных кристаллов, имеющих структуру гексаферритов М-типа / Д.П. Галкина, О.В. Зайцева, А.С. Чернуха // *Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов: труды XIV Российского семинара (Курган, 9-12 октября 2018 г.)*. – Курган, 2018. – С. 28-29.
26. Живулин Д.Е. Анализ возможности экспериментального получения полизамещённых кристаллов со структурой гексаферрита М-типа / Д.Е. Живулин, Д.А. Винник, О.В. Зайцева // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 19-25.
27. Structural and Millimeter-wave Characterization of Flux Grown Al Substituted Barium Hexaferrite Single Crystals / D.A. Vinnik, A.B. Ustinov, D.A. Zherebtsov et al. // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41, Is 10. – P. 12728-12733. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.06.105
28. Three Oxidation States of Manganese in the Barium Hexaferrite BaFe<sub>12-x</sub>Mn<sub>x</sub>O<sub>19</sub> / S. Nemrava, D.A. Vinnik, Z. Hu et al. // *Inorganic Materials*. – 2017. – Vol. 56. – P. 3861-3866. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b02688
29. Millimeter-wave Characterization of Aluminum Substituted Barium Lead Hexaferrite Single Crystals Grown from PbO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Flux / D.A. Vinnik, I.A. Ustinova, A.B. Ustinov et al. // *Ceramics International*. – 2017. – Vol. 17. – P. 15800-15804. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.08.145
30. Electromagnetic Properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>:Ti at Centimeter Wavelengths / D.A. Vinnik, D.S. Klygach, V.E. Zhivulin et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 755. – P. 177-183. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.337
31. Magnetic and Dipole Moments in Indium Doped Barium Hexaferrites / S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, V.A. Turchenko et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2018. – Vol. 457. – P. 83-96. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.02.078

# Experimental Production of Multicomponent Crystals with M-type Hexaferrite Structure

Zaitseva O.V., Zhivulin D.E., Galkina D.P.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[nikonovaolga90@gmail.com](mailto:nikonovaolga90@gmail.com), [zhivulin-74@mail.ru](mailto:zhivulin-74@mail.ru), [dashagalkinaa@gmail.com](mailto:dashagalkinaa@gmail.com)

**Abstract.** The experimental production of multicomponent crystals with M-type hexaferrite structure, the qualitative and quantitative composition of which reflects the formula  $AB_{12}O_{19}$ , where A is Ba, Pb, Sr, Ca, Zn, and B is Fe, Mn, Ni, Ti, Al, Cu, W is carried out. The resulting material of this composition in the future can provide the ability to smoothly change the frequency of ferromagnetic resonance and throughput. In this way, the properties required by electronic equipment manufacturers can be obtained. In the course of the research, have been studied the possibilities of using different methods for synthesizing experimental samples – solid-phase sintering, melting in a platinum crucible, and melting in a stainless steel crucible. According to SEM and EDX results of the obtained samples, two main types of multicomponent crystalline phases were found: hexagonal crystals having the structure of hexaferrite M-type and octahedral crystals having the structure of spinel  $AB_2O_4$ .

**Keywords:** M-type hexaferrites, multicomponent solid solutions, high-entropic phases, experimental studies.

## REFERENCES

1. Gao M.C., Yeh J.-W., Liaw P.K., Zhang Y. High-Entropy Alloys. Fundamentals and Applications, Switzerland, Springer International Publishing, 2016, 524 p.
2. Pogrebnyak A.D., Bagdasaryan A.A., Yakushchenko I.V., Beresnev V.M. The Structure and Properties of High-entropy Alloys and Nitride Coatings Based on Them, *Russian Chemical Reviews*, 2014, vol. 83, is. 11, pp. 1027-1061. DOI: 10.1070/rcr4407
3. Rost C.M., Sachet E., Borman T. et al. Entropy-stabilized Oxides, *Nature Communications*, 2015, vol. 6, pp. 84-85.
4. Jiang L., Lu Y.P., Jiang H. et al. Formation Rules of Single Phase Solid Solution in High Entropy Alloys, *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, is. 6, pp. 588-592. DOI: 10.1179/1743284715y.0000000130
5. Shen W.J., Tsai M.H., Tsai K.Y. et al. Superior Oxidation Resistance of  $(Al_{0.34}Cr_{0.22}Nb_{0.11}Si_{0.11}Ti_{0.22})_{50}N_{50}$  High-Entropy Nitride, *Journal of the Electrochemical Society*, 2013, vol. 160, is. 11, pp. 531-535.
6. Ren B., Shen Z., Liu Z. Structure and Mechanical Properties of Multi-Element  $(AlCrMnMoNiZr)_x$  Coatings by Reactive Magnetron Sputtering, *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 560, pp. 171-176. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.01.148
7. Sheng W., Yang X., Wang C., Zhang Y. Nano-Crystallization of High-Entropy Amorphous  $NbTiAlSiWxNy$  Films Prepared by Magnetron Sputtering, *Entropy*, 2016, vol. 18, is. 6, pp. 226-231. DOI: 10.3390/e18060226
8. Gild J., Zhang Y., Harrington T. et al. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, is. 37946, pp. 1-10. DOI: 10.1038/srep37946
9. Lin M.-I., Tsai M.-H., Shen W.-J., Yeh J.-W. Evolution of Structure and Properties of Multi-Component  $(AlCrTa-TiZr)O_x$  Films, *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, is. 10, pp. 2732-2737. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.142
10. Rost C.M., Sachet E., Borman T. et al. Entropy-Stabilized Oxides, *Nature Communications*, 2015, vol. 6, is. 8485, pp. 1-8.
11. Bérardan D., Franger S., Dragoë D. et al. Colossal Dielectric Constant in High Entropy Oxides, *Rapid Research Letters*, 2016, vol.10, is. 4, pp. 328-333. DOI: 10.1002/pssr.201600043
12. Sarkar A., Djenadic R., Usharani N.J. et al. Nanocrystalline Multicomponent Entropy Stabilised Transition Metal Oxides, *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 37, is. 2, pp. 747-754. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.09.018
13. Berardan D., Franger S., Meena A.K., Dragoë N. Room Temperature Lithium Superionic Conductivity in High Entropy Oxides, *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, vol. 4, is. 24, pp. 9536-9541. DOI: 10.1039/c6ta03249d
14. Rak Zs., Rost C.M., Lim M. et al. Charge Compensation and Electrostatic Transferability in Three Entropy-Stabilized Oxides: Results from Density Functional Theory Calculations, *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 120, is. 095105, pp. 1-11. DOI: 10.1063/1.4962135
15. Rost C.M., Rak Z., Brenner D.W., Maria J.-P. Local Structure of the  $Mg_xNi_xCo_xCu_xZn_xO(x=0.2)$  Entropy-Stabilized Oxide: An EXAFS Study, *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, vol. 100, is. 6, pp. 2732-2738. DOI: 10.1111/jace.14756
16. Berardan D., Meena A.K., Franger S. et al. Controlled Jahn-Teller Distortion in  $(MgCoNiCuZn)O$ -Based High Entropy Oxides, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 704, pp. 693-700. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.02.070
17. Sarkar A., Loho C., Velasco L. et al. Multicomponent Equiatomic Rare Earth Oxides with Narrow Band Gap and Associated Praseodymium Multivalency, *Dalton Transactions*, 2017, vol. 46, is. 36, pp. 12167-12176. DOI: 10.1039/c7dt02077e
18. Djenadic R., Sarkar A., Clemens O. et al. Multicomponent Equiatomic Rare Earth Oxides, *Materials Research Letters*, 2017, vol. 5, is 2, pp. 102-109.



19. Lei Z., Liu X., Li R. et al. Ultrastable Metal Oxide Nanotube Arrays Achieved by Entropy-stabilization Engineering, *Scripta Materialia*, 2018, vol. 146, pp. 340-343. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.12.025

20. Tsau Ch.-H., Hwang Zh.-Y., Chen S.-K. The Microstructures and Electrical Resistivity of (Al, Cr, Ti)FeCoNiOx High-Entropy Alloy Oxide Thin Films, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1155/2015/353140

21. Dąbrowa J., Stygar M., Mikuła A. et al. Synthesis and Microstructure of the (Co,Cr,Fe,Mn,Ni)3O4 High Entropy Oxide Characterized by Spinel Structure, *Materials Letters*, 2018, vol. 216, pp. 32-36. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.148

22. Jiang S., Hu T., Gild J. et al. A New Class of High-entropy Perovskite Oxides, *Scripta Materialia*, 2018, vol. 142, pp. 116-120. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.08.040

23. Rare Earth and Transition Metal Based Entropy Stabilized Perovskite Type Oxides / A. Sarkar, R. Djenadic, D.Wang et al. // Journal of the European Ceramic Societ. – 2018. – Vol. 38, Is. 5. – P. 2318-2327. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.058

24. Zaitseva O.V., Vinnik D.A., Trofimov E.A. The Poly-Substituted M-Type Hexaferrite Crystals Growth, *Materials Science Forum*, 2019, vol. 946, pp. 186-191. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.946.186

25. Galkina D.P., Zaitseva O.V., Chernukha A.S. Thermodynamic model for the description of polysubstituted crystals having the structure of M-type hexaferrites [Termodinamicheskaya model' dlya opisaniya polizameshchennykh kristallov, imeyushchikh strukturu geksaferritov M-tipa], *Trudy XIV Rossiyskogo seminara "Komp'yuternoe modelirovanie fiziko-khimicheskikh svoystv stekol i rasplavov" [Proceedings of the XIV Russian seminar "Computer simulation of the physico-*

*chemical properties of glasses and melts"*, Kurgan, 2018, pp. 28-29. (in Russ.)

26. Zhivulin D.E., Vinnik D.A., Zaitseva O.V. Analysis of the possibility of experimental production of polysubstituted crystals with the structure of M-type hexaferrite [Analiz vozmozhnosti eksperimental'nogo polucheniya polizameshchennykh kristallov so strukturoy geksaferrita M-tipa], *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal [Engineering: a network electronic scientific journal]*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 19-25. (in Russ.)

27. Vinnik D.A., Ustinov A.B., Zherebtsov D.A. et al. Structural and Millimeter-wave Characterization of Flux Grown Al Substituted Barium Hexaferrite Single Crystals, *Ceramics International*, 2015, vol. 41, is 10, pp. 12728-12733. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.06.105

28. Nemrava S., Vinnik D.A., Hu Z. et al. Three Oxidation States of Manganese in the Barium Hexaferrite BaFe12-xMnxO19, *Inorganic Materials*, 2017, vol. 56, pp. 3861-3866. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b02688

29. Vinnik D.A., Ustinova I.A., Ustinov A.B. et al. Millimeter-wave Characterization of Aluminum Substituted Barium Lead Hexaferrite Single Crystals Grown from PbO-B2O3 Flux, *Ceramics International*, 2017, ol. 17, pp. 15800-15804. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.08.145

30. Vinnik D.A., Klygach D.S., Zhivulin V.E. et al. Electromagnetic Properties of BaFe12O19:Ti at Centimeter Wavelengths, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 755, pp. 177-183. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.337

31. Trukhanov S.V., Trukhanov A.V., Turchenko V.A. et al. Magnetic and Dipole Moments in Indium Doped Barium Hexaferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 457, pp. 83-96. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.02.078

#### Библиографическое описание статьи

Зайцева О.В. Экспериментальное получение поликомпонентных кристаллов со структурой гексаферрита М-типа / О.В. Зайцева, Д.Е. Живулин, Д.П. Галкина // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2020. – Т.8, №1. – С. 44-49. DOI: 10.24892/RIJIE/20200108

#### Reference to article

Zaitseva O.V., Zhivulin D.E., Galkina D.P. Experimental production of multicomponent crystals with M-type hexaferrite structure, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2020, vol.8, no.1, pp. 44-49. DOI: 10.24892/RIJIE/20200108