

СИНТЕЗ И СТРУКТУРА КЕРАМИКИ БИЗАМЕЩЕННОГО ГЕКСАФЕРРИТА М-ТИПА $\text{BaFe}_{(11,5-x)}\text{Ti}_{0,5}\text{Al}_x\text{O}_{19}$

*И.А. Солизода^{1,2}, В.Е. Живулин^{1,3}, Д.П. Шерстюк¹, А.Ю. Стариков¹,
Е.А. Трофимов^{1,4}, О.В. Зайцева^{1,4}, Д.А. Винник¹*

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

² Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Республика Таджикистан

³ Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет,
г. Челябинск, Россия

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

Развитие научно-технического прогресса невозможно без создания новых функциональных материалов. Одним из классов таких материалов являются гексагональные ферриты. Наличие у них уникальных физических свойств делает их незаменимым материалом для производства элементов высокочастотной электроники.

Широкое внедрение в повседневную жизнь высокочастотной электроники за последнее десятилетие вызвало большой интерес к гексагональным ферритам. Число публикаций, посвященных синтезу моно- и бизамещенных ферритов с каждым годом заметно возрастает.

Модификация химического состава феррита путем замещения части атомов железа другим элементом, без изменения его структуры, приводит к изменению физических свойств материала. Варьирование свойств конечного феррита путем изменения его химического состава представляет интерес и является перспективным для точной настройки свойств материала под конкретную задачу.

Целью представленной работы является экспериментальное изучение возможности синтеза феррита со структурой магнетоплюмбита, в котором атомы железа частично замещены атомами Al и Ti. Обзор научной литературы по данной проблеме показал отсутствие публикаций по ферритам с таким набором замещающих элементов.

В качестве методов исследования в данной работе применяли рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ, электронную микроскопию и энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию.

В представленной работе приведены результаты экспериментального исследования возможности получения бизамещенного феррита М-типа состава $\text{BaFe}_{(11,5-x)}\text{Ti}_{0,5}\text{Al}_x\text{O}_{19}$, где $x(\text{Al}) = 0,1; 0,5; 1$. В качестве метода получения образцов использовали твердофазный синтез. Данный метод лишен технологических трудностей и является перспективным с точки зрения его масштабирования для синтеза феррита. Спекание образцов производили при трех различных температурах: 1300, 1350 и 1400 °С. В работе показано, что в диапазоне температур 1300–1400 °С происходит формирование монофазных образцов. Произведен расчет параметров кристаллической решетки. Выявлено влияние температуры и концентрации замещающего элемента на изменение параметров кристаллической решетки материала.

Исследование методом электронной микроскопии позволило выявить наличие скрытой микропористости образцов.

Ключевые слова: гексаферрит бария, замещение железа титаном и алюминием, керамика, твердофазный синтез.

Введение

Получение новых функциональных материалов является актуальной задачей современного материаловедения. Гексаферриты представляют собой особую группу материалов, имеющих разнообразный химический состав и структуру. Благодаря своим уникальным магнитным свойствам, ферриты получили широкое практическое применение в науке и технике. Гексагональные ферриты являются незаменимым материалом для изготовления элементов устройств высокочастотной электроники [1, 2]. Развитие и широкое внедрение высокочастотной электроники в последние годы требует создания новых ферритовых материалов. Одним из направлений создания

таких материалов является модифицирование химического состава ферритов без изменения типа их структуры.

Исследование гексаферритов и получение на их основе замещенных структур является динамично развивающимся научным направлением. В работе [3] представлен большой обзор данной проблемы.

Последние 15 лет актуальными являются работы по синтезу и изучению свойств гексаферритов М-типа (типа магнетоплюмбита), допированных различными элементами [3]. Количество допантов может быть больше одного [4–20]. Так в работе [4] методом соосаждения успешно получен гексаферрит состава $BaCo_{1-x}Mn_xFe_{11}O_{19}$. Авторы работы отмечают, что при увеличении степени замещения марганцем происходит монотонное уменьшение намагниченности насыщения при одновременном увеличении коэрцитивной силы. Авторами работы [5] методом твердофазного синтеза удалось получить феррит $Ba_{0,5}Ca_{0,5}Fe_{12-2x}Mg_xTi_xO_{19}$. В работе выявлено, что увеличение концентрации допанта в диапазоне x до 0,2 приводит к увеличению значения намагниченности насыщения. При значениях замещающего элемента больше 0,2 намагниченность насыщения и коэрцитивная сила уменьшаются. В статье [9] авторы успешно получили допированный Ga и Sr гексаферрит с помощью золь-гель метода. Допированные Sr и Ga материалы имеют более высокие значения всех магнитных параметров, таких как намагниченность насыщения, удерживающая способность, коэффициент прямоугольности и коэрцитивной силы, чем у исходного незамещенного гексаферрита $BaFe_{12}O_{19}$. Материал $BaCr_{0,3}Ga_{0,3}Fe_{11,4}O_{19}$ ($x = 0,3$) оказался лучшим среди всех синтезированных, так как при таком составе магнитные параметры достигают максимальных значений. Высокие значения коэрцитивной силы делают эти материалы лучшим кандидатом для использования в качестве носителей высокой плотности записи и постоянных магнитов.

Модификация химического состава без изменения типа структуры материала позволяет значительно изменять магнитные свойства гексаферрита, такие как величину коэрцитивной силы, намагниченности насыщения, температуры Кюри [6, 7]. Таким образом, возникает возможность плавно изменять его свойства, меняя химический состав в широком диапазоне. Получение материала, свойствами которого можно целенаправленно количественно управлять, является перспективным для практического использования.

В литературе встречаются различные способы синтеза ферритов. Наиболее доступным и простым среди них является твердофазный синтез [21–25].

Целью настоящей работы является изучение возможности синтеза гексаферрита бария М-типа в котором часть атомов железа замещены атомами титана и алюминия.

Задачами данной работы являются:

- определение физико-химических параметров, необходимых для синтеза монофазного материала состава $BaFe_{(11,5-x)}Ti_{0,5}Al_xO_{19}$, где x изменяется от 0,1 до 1;
- получение методом твердофазного синтеза образцов такого материала;
- изучение структуры полученного материала.

Экспериментальная часть

Исходными компонентами для приготовления образцов являлись порошки оксидов железа (Fe_2O_3), алюминия (Al_2O_3), титана (TiO_2) и карбоната бария ($BaCO_3$). Все используемые химические реактивы имели квалификацию ЧДА.

Исходные вещества отмеряли в заданных стехиометрических отношениях, смешивали и перетирали в течение 30 минут в агатовой ступе. В табл. 1 представлен расчет массовой доли исходных веществ, необходимых для синтеза образцов в общей смеси шихты.

Расчет массовой доли компонентов

Таблица 1

№	Химическая формула	Массовая доля компонентов			
		$BaCO_3$	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2
1	$BaFe_{11,4}Ti_{0,5}Al_{0,1}O_{19}$	0,1712	0,7897	0,0044	0,0346
2	$BaFe_{11}Ti_{0,5}Al_{0,5}O_{19}$	0,1729	0,7697	0,0223	0,0350
3	$BaFe_{10,5}Ti_{0,5}AlO_{19}$	0,1752	0,7441	0,0452	0,0354

После перетиравания полученную смесь прессовали в таблетки. Прессование производили в металлической пресс-форме диаметром 20 мм при помощи лабораторного гидравлического прес-са. Усилие прессования составляло 3 т/см².

Полученные таблетки помещались на платиновом листе в высокотемпературную электропечь и спекались при температурах 1300, 1350 и 1400 °С в течение 5 часов. Платиновая подложка необходима для предотвращения взаимодействия образца с элементами футеровки печи. Скорость нагрева печи составляла 400 °С/ч. Скорость охлаждения печи до 900 °С составляла 100 °С/ч, при меньших температурах скорость охлаждения не контролировали.

В общей сложности данным образом было получено девять керамических образцов, отличающихся химическим составом и температурой спекания.

Фазовый состав и структура полученных образцов изучали при помощи порошкового дифрактометра фирмы Rigaku модель Optima IV (излучение Cu). Морфологические особенности поверхности и элементный состав изучали при помощи электронного сканирующего микроскопа фирмы JEOL модель JSM7001F, оборудованного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA X-max 80 (Oxford Instruments).

Обсуждение результатов

В табл. 2 представлен элементный состав по данным энергодисперсионной спектроскопии и рассчитанные брутто-формулы синтезированных образцов. Из табл. 2 видно, что брутто-формулы с удовлетворительной точностью соответствуют изначально заданному составу.

Элементный состав образцов

Таблица 2

№	Атом. %					Брутто-формула
	Al	Ti	Fe	Ba	O	
1	0,38	1,94	37,38	3,56	56,73	BaFe _{11,30} Al _{0,11} Ti _{0,59} O ₁₉
2	1,55	1,96	35,27	3,69	57,53	BaFe _{10,91} Al _{0,48} Ti _{0,61} O ₁₉
3	3,14	2,02	32,92	3,64	58,28	BaFe _{10,37} Al _{0,99} Ti _{0,64} O ₁₉

На рис. 1–3 представлены электронные изображения микроструктур образцов, полученных при температуре 1400 °С. Изображения структур образцов, полученных при температурах 1300 и 1350 °С, имеют схожий вид. Видно, что поверхность всех образцов представляет из себя плотную монолитную массу, которая не имеет ярко выраженных зерен. По всему объёму материал имеет равномерно распределённые поры сферической формы. Размер пор варьируется в диапазоне 1–10 мкм.

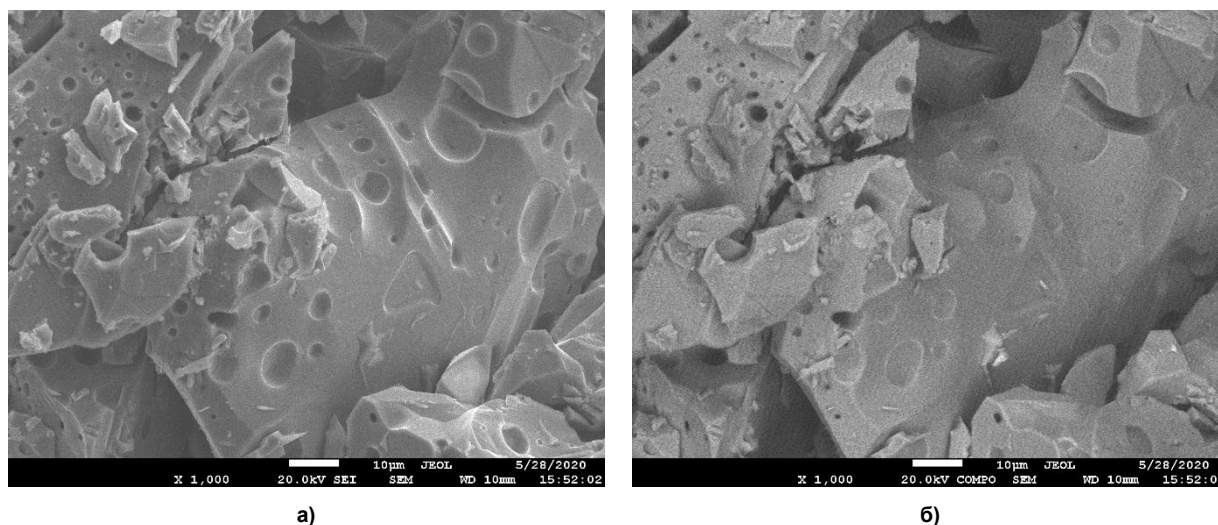


Рис. 1. Электронное изображение образца BaFe_{11,30}Al_{0,11}Ti_{0,59}O₁₉, синтезированного при температуре 1400 °С: а – полученное во вторичных электронах, б – в отраженных электронах

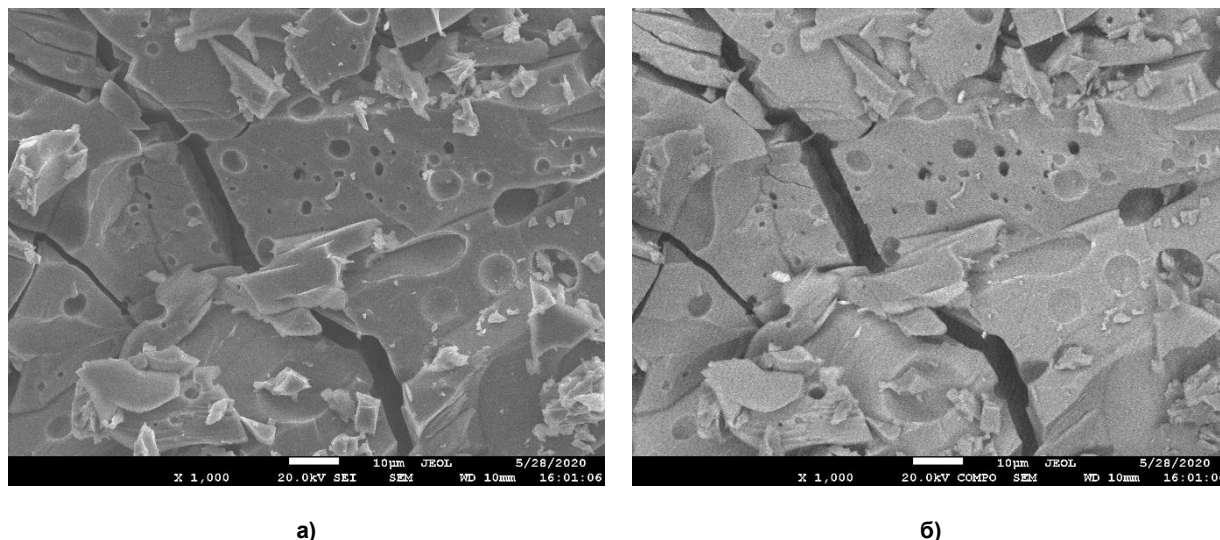


Рис. 2. Электронное изображение образца $BaFe_{10,91}Al_{0,48}Ti_{0,61}O_{19}$, синтезированного при температуре 1400 °С: а – полученное во вторичных электронах, б – в отраженных электронах

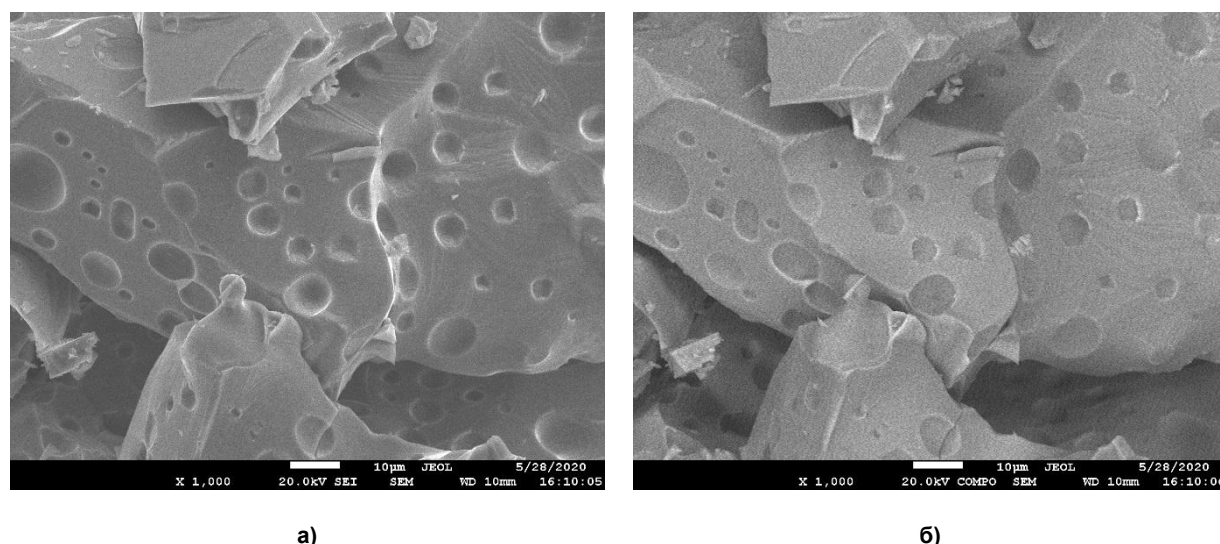


Рис. 3. Электронное изображение образца $BaFe_{10,37}Al_{0,95}Ti_{0,64}O_{19}$, синтезированного при температуре 1400 °С: а – полученное во вторичных электронах, б – в отраженных электронах

На рис. 4–6 представлены спектры рентгеновской дифракции образцов, полученных при температурах 1300, 1350 и 1400 °С. Из рис. 1–3 видно, что все полученные образцы являются монофазными и имеют структуру гексаферрита бария М-типа. Изменение химического состава приводит к перераспределению интенсивностей рентгеновских рефлексов, при этом новых рефлексов не появляется. Вероятнее всего, это является следствием перераспределения электронной плотности внутри кристаллической решетки. Изменение температуры спекания так же приводит к перераспределению интенсивности рентгеновских рефлексов. Повышение температуры спекания приводит к увеличению интенсивности рефлексов и уменьшению их ширины. Данный факт указывает на увеличение степени кристалличности и уменьшение дефектности микрокристаллов.

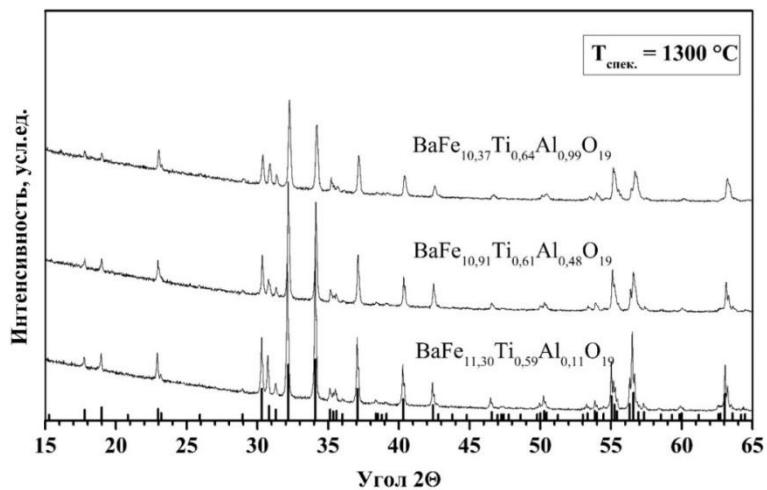


Рис. 4. Рентгенограммы образцов, полученных при температуре $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (штрихами обозначены литературные данные [26])

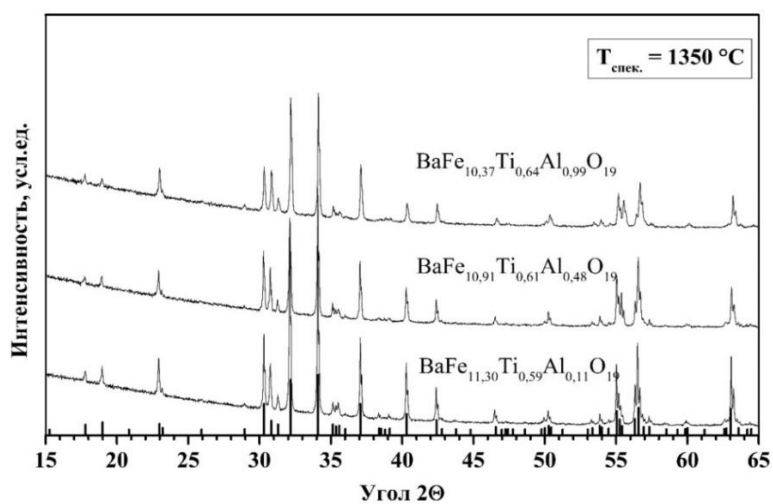


Рис. 5. Рентгенограммы образцов, полученных при температуре $T = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (штрихами обозначены литературные данные [26])

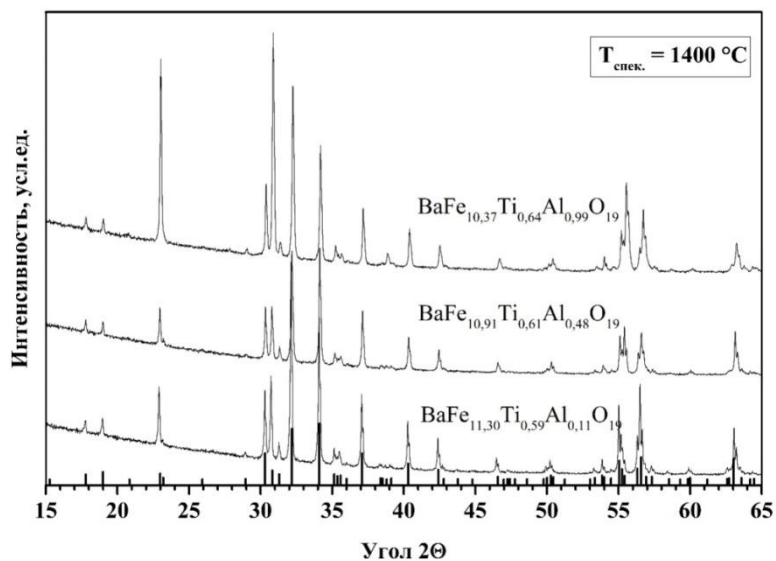


Рис. 6. Рентгенограммы образцов, полученных при температуре $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (штрихами обозначены литературные данные [26])

В табл. 3 представлен расчет параметров кристаллической решетки образцов, синтезированных при температурах 1300, 1350 и 1400 °С. Расчет производили при помощи программного комплекса Rigaku PDXL. Из табл. 3 видно, что увеличение концентрации алюминия приводит к уменьшению параметров решетки. Такая закономерность прослеживается для всех температур спекания. Уменьшение параметров кристаллической решетки с увеличением концентрации алюминия связано с тем, что ионные радиусы железа ($Fe^{3+} = 0,062$ нм) больше ионного радиуса алюминия (0,052 нм) [26]. Внедрение атома алюминия на позицию железа приводит к искажению кристаллической решетки. Чем больше позиций железа замещается на алюминий, тем сильнее происходит искажение решетки.

Таблица 3

Параметры кристаллической решетки

№	Химическая формула	$T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$	
		$a, \text{ \AA}$	$c, \text{ \AA}$	$a, \text{ \AA}$	$c, \text{ \AA}$	$a, \text{ \AA}$	$c, \text{ \AA}$
1	$BaFe_{11,30}Al_{0,11}Ti_{0,59}O_{19}$	5,8876	23,2251	5,8882	23,2248	5,8872	23,2356
2	$BaFe_{10,91}Al_{0,48}Ti_{0,61}O_{19}$	5,8834	23,1910	5,8827	23,1840	5,8824	23,1870
3	$BaFe_{10,37}Al_{0,99}Ti_{0,64}O_{19}$	5,8808	23,1440	5,8736	23,1215	5,8754	23,1440
	$BaFe_{12}O_{19}$ [26]	$a = 5,8930 \text{ \AA}; c = 23,1940 \text{ \AA}$					

В табл. 4 представлен расчет объема кристаллической решетки и рентгеновской плотности для всех синтезированных образцов. Расчет объема кристаллической решетки производили по формуле

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c, \quad (1)$$

где a и c – параметры кристаллической решетки, полученные из структурного анализа (см. табл. 3). Значение рентгеновской плотности рассчитывали по формуле

$$P_{x\text{-ray}} = \frac{Z \cdot M}{N_A \cdot V}, \quad (2)$$

где Z – число формульных единиц (для гексаферрита М-типа $Z = 2$), M – молекулярный вес, N_A – число Авогадро, V – объем кристаллической решетки. Из табл. 4 видно, как рассчитанные объем и плотность изменяют свои значения в зависимости от температуры и химического состава.

Таблица 4

Объем кристаллической решетки и рентгеновская плотность

№	Химическая формула	$T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$	
		$V, \text{ \AA}^3$	$P_{x\text{-ray}}, \text{ кг/м}^3$	$V, \text{ \AA}^3$	$P_{x\text{-ray}}, \text{ кг/м}^3$	$V, \text{ \AA}^3$	$P_{x\text{-ray}}, \text{ кг/м}^3$
1	$BaFe_{11,30}Al_{0,11}Ti_{0,59}O_{19}$	697,2	5261,86	697,3	5261,11	697,4	5260,35
2	$BaFe_{10,91}Al_{0,48}Ti_{0,61}O_{19}$	695,2	5221,84	694,8	5224,85	694,8	5224,85
3	$BaFe_{10,37}Al_{0,99}Ti_{0,64}O_{19}$	693,2	5167,76	690,8	5185,72	691,9	5177,47
	$BaFe_{12}O_{19}$ [26]	$V = 697,5 \text{ \AA}^3; P_{x\text{-ray}} = 5292,26 \text{ кг/м}^3$					

В табл. 5 представлены результаты расчета размеров областей когерентного рассеивания, которые коррелируют со средним размером кристаллитов. Расчет производили при помощи программного комплекса Rigaku PDXL. Из табл. 5 видно, что размер областей когерентного рассеивания уменьшается при увеличении концентрации алюминия.

Таблица 5

Размер областей когерентного рассеивания

№	Химическая формула	 \AA		
		$T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	$BaFe_{11,30}Al_{0,11}Ti_{0,59}O_{19}$	730	837	767
2	$BaFe_{10,91}Al_{0,48}Ti_{0,61}O_{19}$	588	673	890
3	$BaFe_{10,37}Al_{0,99}Ti_{0,64}O_{19}$	462	815	635

Заключение

Методом твердофазного синтеза в диапазоне температур 1300–1400 °С получены монофазные образцы керамического материала со структурой гексаферрита М-типа состава $\text{BaFe}_{(11,5-x)}\text{Ti}_{0,5}\text{Al}_x\text{O}_{19}$, где x изменяется в диапазоне 0,1–1. В ходе исследования полученного материала выявлено, что изменение концентрации замещающего железа алюминия приводит к уменьшению параметров кристаллической решетки, вследствие чего происходит уменьшение объема кристаллической решетки и рентгеновской плотности материала.

Рентгеноструктурный анализ показал, что оптимальной температурой для синтеза гексаферрита бария, в котором часть атомов железа замещена атомами алюминия и титана, является 1400 °С с изотермической выдержкой в течение 5 часов.

Исследование методом электронной микроскопии показало, что полученный материал имеет плотную монолитную структуру без выраженных зерен. При этом материал имеет ярко выраженную скрытую микропористость.

Выявленное влияние температуры спекания на структурные данные материала может отражаться на его физических свойствах. Данный вопрос требует дополнительного самостоятельного исследования.

Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-38-70057.

Литература/References

1. Song Y.-Y., Ordóñez-Romero C.L., Wu M. Millimeter Wave Notch Filters Based on Ferromagnetic Resonance in Hexagonal Barium Ferrites. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, iss. 14, vol. 95, pp. 142506. DOI: 10.1063/1.3246170
2. Pardavi-Horvath M. Microwave Applications of Soft Ferrites. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2000, vol. 215–216, pp. 171–183. DOI: 10.1016/S0304-8853(00)00106-2
3. Pullar R.C. Hexagonal Ferrites: A Review of the Synthesis, Properties and Applications of Hexaferrite Ceramics. *Progress in Materials Science*, 2012, iss. 7, vol. 57, pp. 1191–1334. DOI: 10.1016/J.PMATSCI.2012.04.001
4. Phan T.L., Tran N., Nguyen H.H., Yang D.S., Dang N.T., Lee B.W. Crystalline and Electronic Structures and Magnetic Properties of $\text{BaCo}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_{11}\text{O}_{19}$ Hexaferrites. *J. Alloys Compd.*, 2020, vol. 816. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152528
5. Huang K., Yu J., Zhang L., Xu J., Li P., Yang Z., Liu C., Wang W., Kan X. Synthesis and Characterizations of Magnesium and Titanium Doped M-type Barium Calcium Hexaferrites by a Solid State Reaction Method. *J. Alloys Compd.*, 2020, vol. 825, pp. 154072. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154072
6. Mariño-Castellanos P.A., Anglada-Rivera J., Cruz-Fuentes A., Lora-Serrano R. Magnetic and Microstructural Properties of the Ti^{4+} -Doped Barium Hexaferrite. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2004, iss. 2–3, vol. 280, pp. 214–220. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.03.015
7. Teh G., Nagalingam S., Jefferson D. Preparation and Studies of Co(II) and Co(III)-Substituted Barium Ferrite Prepared by Sol–gel Method. *Mater. Chem. Phys.*, 2007, vol. 101, pp. 158–162. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2006.03.008
8. Gultom G., Rianna M., Sebayang P., Ginting M. The effect of Mg-Al Binary Doped Barium Hexaferrite for Enhanced Microwave Absorption Performance. *Case Stud. Therm. Eng.*, 2020, vol. 18. DOI: 10.1016/j.csite.2019.100580
9. Jazirehpour M., Shams M.H., Khani O. Modified Sol–Gel Synthesis of Nanosized Magnesium Titanium Substituted Barium Hexaferrite and Investigation of the Effect of High Substitution Levels on the Magnetic Properties. *J. Alloys Compd.*, 2012, vol. 545, pp. 32–40. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.08.043
10. Rianna M., Situmorang M., Kurniawan C., Tetuko A.P., Setiadi E.A., Ginting M., Sebayang P. The Effect of Mg-Al Additive Composition on Microstructure, Magnetic Properties, and Microwave Absorption on $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Mg}_x\text{Al}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0-0.5$) Material Synthesized from Natural Iron Sand. *Mater. Lett.*, 2019, vol. 256. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126612
11. Alange R.C., Khirade P.P., Birajdar S.D., Humbe A. V, Jadhav K.M. Structural, Magnetic and Dielectrical Properties of Al–Cr Co-substituted M-type Barium Hexaferrite Nanoparticles. *J. Mol. Struct.*, 2016, vol. 1106, pp. 460–467. DOI: 10.1016/j.molstruc.2015.11.004

12. Tsutaoka T., Tsurunaga A., Koga N. Permeability and Permittivity Spectra of Substituted Barium Ferrites $BaFe_{12-x}(Ti_{0,5}Co_{0,5})_xO_{19}$ ($x=0$ to 5). *J. Magn. Magn. Mater.*, 2016, vol. 399, pp. 64–71. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.09.032
13. Chen J., Meng P., Wang M., Zhou G., Wang X., Xu G. Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of $BaMg_xCo_{1-x}TiFe_{10}O_{19}$. *J. Alloys Compd*, 2016, vol. 679, pp. 335–340. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.04.001
14. Baniasadi A., Ghasemi A., Nemati A., Azami Ghadikolaei M., Paimozd E. Effect of Ti–Zn Substitution on Structural, Magnetic and Microwave Absorption Characteristics of Strontium Hexaferrite. *J. Alloys Compd*, 2014, vol. 583, pp. 325–328. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.08.188
15. Chawla S.K., Mudsainiyan R.K., Meena S.S., Yusuf S.M. Sol–gel Synthesis, Structural and Magnetic Properties of Nanoscale M-type Barium Hexaferrites $BaCo_xZr_xFe_{(12-2x)}O_{19}$. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2014, vol. 350, pp. 23–29. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.09.007
16. Soman V.V., Nanoti V.M., Kulkarni D.K. Dielectric and Magnetic Properties of Mg–Ti Substituted Barium Hexaferrite. *Ceram. Int.*, 2013, iss. 5, vol. 39, pp. 5713–5723. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.12.089
17. Vakhitov M.G., Klygach D.S., Vinnik D.A., Zhivulin V.E., Knyazev N.S. Microwave Properties of Aluminum-substituted Barium Hexaferrite $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ ceramics in the Frequency Range of 32–50 GHz. *J. Alloys Compd*, 2020, vol. 816. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152682
18. Setiadi E.A., Sari F.P., Sari A.Y., Ramlan R., Sebayang P. Microstructures and Magnetic Properties of $BaFe_{12}O_{19}$ with $MgO-Al_2O_3$ Additives. *Widyariset*, 2016, iss. 1, vol. 2, pp. 1. DOI: 10.14203/widyariset.2.1.2016.1-8
19. Shams M.H., Salehi S.M.A., Ghasemi A. Electromagnetic Wave Absorption Characteristics of Mg–Ti Substituted Ba-hexaferrite. *Mater. Lett.*, 2008, iss. 10–11, vol. 62, pp. 1731–1733. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.09.073
20. Setiadi E.A., Kurniawan C., Sebayang P., Ginting M. Microstructures, Physical and Magnetic Properties of $BaFe_{12}O_{19}$ Permanent Magnets with the Addition of Al_2O_3-MnO . *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 817, pp. 12054. DOI: 10.1088/1742-6596/817/1/012054
21. Vu H., Nguyen D., Fisher J.G., Moon W.-H., Bae S., Park H.-G., Park B.-G. CuO-based Sintering Aids for Low Temperature Sintering of $BaFe_{12}O_{19}$ Ceramics. *J. Asian Ceram. Soc.*, 2013, iss. 2, vol. 1, pp. 170–177. DOI: 10.1016/j.jascer.2013.05.002
22. El Shater R.E., El-Ghazzawy E.H., El-Nimr M.K. Study of the Sintering Temperature and the Sintering Time Period Effects on the Structural and Magnetic Properties of M-type Hexaferrite $BaFe_{12}O_{19}$. *J. Alloys Compd*, 2018, vol. 739, pp. 327–334. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.12.228
23. Vinnik D., Tarasova A., Zherebtsov D., Gudkova S., Galimov D., Zhivulin V., Trofimov E., Nemrava S., Perov N., Isaenko L., Niewa R. Magnetic and Structural Properties of Barium Hexaferrite $BaFe_{12}O_{19}$ from Various Growth Techniques. *Materials*, 2017, iss. 6, vol. 10, pp. 578. DOI: 10.3390/ma10060578
24. Vinnik D., Zhivulin V., Trofimov E., Starikov A., Zherebtsov D., Zaitseva O., Gudkova S., Taskaev S., Klygach D., Vakhitov M., Sander E., Sherstyuk D., Trukhanov A. Extremely Polysubstituted Magnetic Material Based on Magnetoplumbite with a Hexagonal Structure: Synthesis, Structure, Properties, Prospects. *Nanomaterials*, 2019, iss. 4, vol. 9, pp. 559. DOI: 10.3390/nano9040559
25. Gudkova S.A., Chernukha A.S., Vinnik D.A. The Thermal Expansion of Solid State $BaFe_{12}O_{19}$ and Flux $Ba_{0,8}Pb_{0,2}Fe_{12}O_{19}$ Pellets. *Solid State Phenom.*, 2017, vol. 265, pp. 906–910. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.906
26. Townes W.D., Fang J.H., Perrotta A.J. The Crystal Structure and Refinement of Ferrimagnetic Barium Ferrite, $BaFe_{12}O_{19}$. *Z. Kristallog*, 1967, iss. 125, vol. 125, pp. 437–449. DOI: 10.1524/zkri.1967.125.125.437

Солизода Иброхими Ашурали, инженер-исследователь, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76; Таджикский национальный университет, 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. E-mail: Solehzoda-i@mail.ru

Живулин Владимир Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории роста кристаллов НОЦ «Нанотехнологии», 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

Шерстюк Дарья Петровна, инженер-исследователь, студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. E-mail: daryasherstyuk77@gmail.ru

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

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

Зайцева Ольга Викторовна, аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76; ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, 456217, г. Златоуст, ул. Тургенева, 16. E-mail: nikonovaolga90@gmail.com

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 1 сентября 2020 г.

DOI: 10.14529/chem200408

SYNTHESIS AND STRUCTURE OF CERAMICS OF BISUBSTITUTED M-TYPE HEXAFERRITE $\text{BaFe}_{(11.5-x)}\text{Ti}_{0.5}\text{Al}_x\text{O}_{19}$

I.A. Solizoda^{1,2}, *solehzoda-i@mail.ru*

V.E. Zhivulin^{1,3}, *zhivulinve@mail.ru*

*D.P. Sherstyuk*¹, *daryasherstyuk77@gmail.com*

*A.Yu. Starikov*¹, *starikov-andrey@mail.ru*

E.A. Trofimov^{1,4}, *tea7510@gmail.com*

O.V. Zaitseva^{1,4}, *nikonovaolga90@gmail.com*

*D.A. Vinnik*¹, *vinnikda@susu.ru*

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² Tajik National University, Dushanbe, Republic of Tajikistan

³ South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russian Federation

⁴ South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation

The development of scientific and technological progress is impossible without the creation of new functional materials. One of the classes of such materials are hexagonal ferrites. Their unique physical properties make them an irreplaceable material for the production of high-frequency electronics.

The widespread introduction of high-frequency electronics into everyday life, over the past decade, has generated great interest in hexagonal ferrites. The number of publications devoted to the synthesis of mono- and bisubstituted ferrites noticeably increases every year.

Modification of the chemical composition of a ferrite by replacing some of the iron atoms with another element, without changing its structure, leads to a change in physical properties of the material. Variation of the final ferrite properties, by changing its chemical composition, is of interest and is promising for fine tuning the material properties for a specific task.

The aim of the present work is to experimentally study the possibility of synthesizing ferrite with a magnetoplumbite structure, in which the iron atoms are partially replaced by the Al and Ti atoms. A review of the scientific literature on this issue showed the absence of publications on ferrites with such a set of substitute elements.

The X-ray phase and structural analysis, electron microscopy, and energy-dispersive X-ray spectroscopy were used as research methods in the present study.

The article offers the results of an experimental study of the possibility of obtaining bisubstituted M-type ferrite of the $BaFe_{(11.5-x)}Ti_{0.5}Al_xO_{19}$ composition, where x (Al) = 0.1, 0.5, 1. Solid-phase synthesis has been used as a method for preparing samples. This method is devoid of technological difficulties and is promising from the point of view of its scaling for the synthesis of ferrite. The samples have been sintered at three different temperatures: 1300, 1350, and 1400 °C. It is shown that in the temperature range 1300–1400 °C the formation of monophase samples occurs. The calculation of the parameters of the crystal lattice has been made. The influence of temperature and concentration of a substituting element on the change in the parameters of the crystal lattice of the material has been revealed.

The study by the electron microscopy method made it possible to reveal the presence of latent microporosity of the samples.

Keywords: barium hexaferrite, substitution of iron with titanium and aluminum, ceramics, solid-phase synthesis.

Received 1 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Синтез и структура керамики бизамещенного гексаферрита М-типа $BaFe_{(11.5-x)}Ti_{0.5}Al_xO_{19}$ / И.А. Солизода, В.Е. Живулин, Д.П. Шерстюк и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 110–119. DOI: 10.14529/chem200408

FOR CITATION

Solizoda I.A., Zhivulin V.E., Sherstyuk D.P., Starikov A.Yu., Trofimov E.A., Zaitseva O.V., Vinnik D.A. Synthesis and Structure of Ceramics of Bisubstituted M-Type Hexaferrite $BaFe_{(11.5-x)}Ti_{0.5}Al_xO_{19}$. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 110–119. (in Russ.). DOI: 10.14529/chem200408
