

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛЬТ-ОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ

**А.Ю. Стариков, В.Е. Живулин, А.В. Прокудин,
Е.Е. Сандер, Д.П. Шерстюк, Д.А. Винник**

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

К настоящему времени задача создания новых, ранее неизвестных материалов, которые будут обладать востребованными на практике характеристиками, остается актуальной. В данной статье представлены результаты исследования магнитных материалов, которые пользуются большим спросом в современных технологиях.

Одна из важных характеристик магнитных материалов – электрическое сопротивление. Так как удельное электрическое сопротивление магнитных материалов, главным образом, зависит от их химического состава, структуры и способа получения, цель представленного исследования состоит в том, чтобы создать и исследовать концентрационный ряд композитов, отобрать предпочтительные составы материалов на основе гексаферрита бария для дальнейшего изучения.

В данной работе представлены результаты получения и исследования композиционных материалов на основе гексаферрита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, который известен разнообразием своих функциональных характеристик. Важная среди них – высокое значение удельного электрического сопротивления. Для исследования свойств таких материалов была подготовлена серия образцов, полученных методом двухстадийного твердофазного синтеза гексаферрита бария с добавлением оксида алюминия Al_2O_3 и оксида бора B_2O_3 . Первая стадия – синтез гексаферрита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ из карбоната бария BaCO_3 и оксида железа Fe_2O_3 (гомогенизация, компактирование, спекание, измельчение, классификация порошка). Вторая стадия – получение композиционных материалов из порошков гексаферрита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, оксидов бора B_2O_3 или алюминия Al_2O_3 (гомогенизация, компактирование, спекание). Добавление оксидов алюминия Al_2O_3 и бора B_2O_3 , по мнению авторов, способно обеспечить варьирование в широких пределах свойств композита за счет разницы магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости его компонентов.

Для измерения электрического сопротивления синтезированных образцов использовали устройство МС-2500 в диапазоне напряжений постоянного тока 50–2500 В.

В работе построены зависимости удельного сопротивления от концентрации оксидов. Определены оптимальные составы с лучшими значениями удельного сопротивления для исследуемых композитов.

Ключевые слова: феррит бария, магнитные материалы, композиционные материалы, сопротивление.

Введение

Актуальной проблемой современной химии твердого тела является создание новых материалов. Один из методов получения материалов с уникальными свойствами – изменение химического состава и/или структуры [1].

Особое внимания исследователи уделяют задаче получения новых материалов для использования в излучателях и поглотителях электромагнитного излучения, которые находят применение для защиты биологических объектов, магнитах, элементах памяти, компонентах электроники, элементах микродвигателей, изготовлении магнитных композитов

с регулируемым набором свойств (например, эластомеры) [2, 3].

Среди магнитных материалов особое место занимают гексагональные ферриты М-типа. В частности, гексаферрит бария и его производные привлекают внимание многих исследователей своими универсальными свойствами, такими как анизотропия свойств, высокая коэрцитивная сила, высокая частота ферромагнитного резонанса, низкие потери на вихревые токи, высокая температура Кюри, высокая химическая стабильность, устойчивость к коррозии и т. д. [4]. Функциональные характеристики ферритов традиционно модифицируют путем легирования, что позволяет,

в частности, регулировать их электропроводность и потери на вихревые токи, а также создает необходимую микроструктуру [5].

Из-за постоянно растущего спроса на материалы, обладающие поглощающей способностью, предпринимались попытки модифицировать функциональные свойства гексаферритов бария путем замещения ионов железа как магнитными, так и немагнитными катионами. Кроме того, изменение свойств зависит также от способа получения и условий обработки материалов [6–8]. Замещение ионов Fe^{3+} приводит к изменению магнитных свойств гексаферрита бария, например, намагниченности насыщения, коэрцитивной силы и анизотропии. Магнитные свойства также могут быть изменены путем изменения микроструктуры. Известно, что легирование $BaFe_{12}O_{19}$ ионами Zn–Zr, Co–Ti, La–Pr, Co, Ni–Zr, Co–Zr, Zn–Ti и Mg–Ti приводит к изменению их электрических и магнитных свойств [9–14].

В представленной работе приведены результаты создания и исследования композитов на основе ферритов, что, по мнению авторов, способно в более широких пределах модифицировать свойства материала.

Экспериментальная часть

Для создания композитов шихту готовили методом двухстадийного твердофазного синтеза. Первая стадия – синтез гексаферрита бария $BaFe_{12}O_{19}$ из $BaCO_3$ и Fe_2O_3 (гомогенизация, компактирование, спекание при $1350\text{ }^\circ\text{C}$ [15], измельчение, классификация порошка). Вторая стадия – получение композиционных материалов из порошка гексаферрита бария $BaFe_{12}O_{19}$, оксидов бора B_2O_3 или алюминия Al_2O_3 , смешанных в соотношениях, приведенных в табл. 1 (гомогенизация, компактирование, спекание при $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$ и $T = 1400\text{ }^\circ\text{C}$ для $BaFe_{12}O_{19}-B_2O_3$ и $BaFe_{12}O_{19}-Al_2O_3$ соответственно).

Для определения функциональных характеристик полученных композитов проводили измерение электрического сопротивления при различных напряжениях постоянного тока (вольт-омические характеристики) прибором МС-2500 (измеритель сопротивления, увлажненности и степени старения электроизоляции). Данные измерений приведены в табл. 1. Условия проведения измерений в помещении: температура $T = 17,8\text{ }^\circ\text{C}$ и влажность воздуха 80 %.

Таблица 1

Результаты измерений сопротивления образцов

№	Образец	Сопротивление, МОм					
		50 В	100 В	500 В	1000 В	1500 В	2500 В*
1**	Эпоксидная смола + $BaFe_{12}O_{19}$	–	–	236 000	222 000	208 000	138 000/166 000/1,2
2	20 % Al_2O_3 + 80 % $BaFe_{12}O_{19}$	32,1	30,32	24,74	22,08	20,27	12,2/16,4/1,32
3	40 % Al_2O_3 + 60 % $BaFe_{12}O_{19}$	491	440,8	341,6	292,3	261,5	162,4/223,1/1,37
4	60 % Al_2O_3 + 40 % $BaFe_{12}O_{19}$	131,5	115,3	88,1	75,08	62,63	22,68/47,17/2,08
5	80 % Al_2O_3 + 20 % $BaFe_{12}O_{19}$	114,4	117,5	135,3	144,2	128,6	34,88/68,06/1,95
6	2 % B_2O_3 + 98 % $BaFe_{12}O_{19}$	44,25	38,75	21,52	13,28	9,14	9,97/3,07/0,3
7	4 % B_2O_3 + 96 % $BaFe_{12}O_{19}$	206	174,6	94,35	59,78	43,28	43,71/26,79/0,61
8	6 % B_2O_3 + 94 % $BaFe_{12}O_{19}$	484,3	403,1	184,4	103,6	68,84	54,52/38,29/0,7
9	8 % B_2O_3 + 92 % $BaFe_{12}O_{19}$	1735	1432	627,4	333,6	210	113,7/103,4/0,9
10	10 % B_2O_3 + 90 % $BaFe_{12}O_{19}$	6183	5098	2162	1090	658	336,6/302/0,89
11	12 % B_2O_3 + 88 % $BaFe_{12}O_{19}$	756,7	643,5	259,5	120	67,9	29,22/27,19/0,93
12	14 % B_2O_3 + 86 % $BaFe_{12}O_{19}$	725,4	632,7	301,3	159,2	98,15	46,26/44,71/0,96
13	16 % B_2O_3 + 84 % $BaFe_{12}O_{19}$	891,2	733,4	334,2	181,8	115,4	56,54/53,86/0,95
14	18 % B_2O_3 + 82 % $BaFe_{12}O_{19}$	28,17	22,32	9,306	4,744	2,734	–
15	20 % B_2O_3 + 80 % $BaFe_{12}O_{19}$	1545	1284	507,1	236,6	133,7	55,33/54,70/0,98
16	40 % B_2O_3 + 60 % $BaFe_{12}O_{19}$	–	134 600	18 820	7599	4189	2318/1569/0,67
17	60 % B_2O_3 + 40 % $BaFe_{12}O_{19}$	–	–	655 100	485 800	397 200	280 200/306 900/1,09

* В данном столбце результаты представлены в виде $R_{T1}/R_{T2}/Ab_1$, где R_{T1} и R_{T2} – значения сопротивления, полученные за время $T_1 = 15$ с и $T_2 = 60$ с с момента подачи напряжения на образец соответственно; Ab_1 – коэффициент абсорбции, характеризующий изменение сопротивления образца по времени ($Ab_1 = R_{T2}/R_{T1}$).

** Образец № 1 (эпоксидная смола + $BaFe_{12}O_{19}$) приведен для сравнения.

Физическая химия и физика металлургических систем

В табл. 2 представлены значения удельного сопротивления композитных материалов гексаферрита бария с разной концентрацией алюминия. Эксперимент проводили в диапазоне напряжений 50–2500 В.

Для наглядности на рис. 1 приведена зависимость удельного сопротивления композитов $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с Al_2O_3 от напряжения.

Из графиков рис. 1 видно, что с увеличением напряжения значения удельного электросопротивления падают. Кроме того, сопротивление зависит от добавляемого количества Al_2O_3 [16].

Результаты измерений второй серии композитов ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с B_2O_3) представлены в табл. 3.

Таблица 2

Значения удельного сопротивления композитов оксида алюминия с гексаферритом бария при разном напряжении

№	Образец	D, мм	h, мм	Удельное сопротивление, МОм·м					
				50 В	100 В	500 В	1000 В	1500 В	2500 В
2	20 % Al_2O_3 + 80 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	5,15	1,957	1,849	1,508	1,346	1,236	0,744
3	40 % Al_2O_3 + 60 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	6,15	25,069	22,506	17,441	14,924	13,351	8,292
4	60 % Al_2O_3 + 40 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	7,00	5,899	5,172	3,952	3,368	2,809	1,017
5	80 % Al_2O_3 + 20 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	8,60	4,177	4,290	4,940	5,265	4,695	1,274

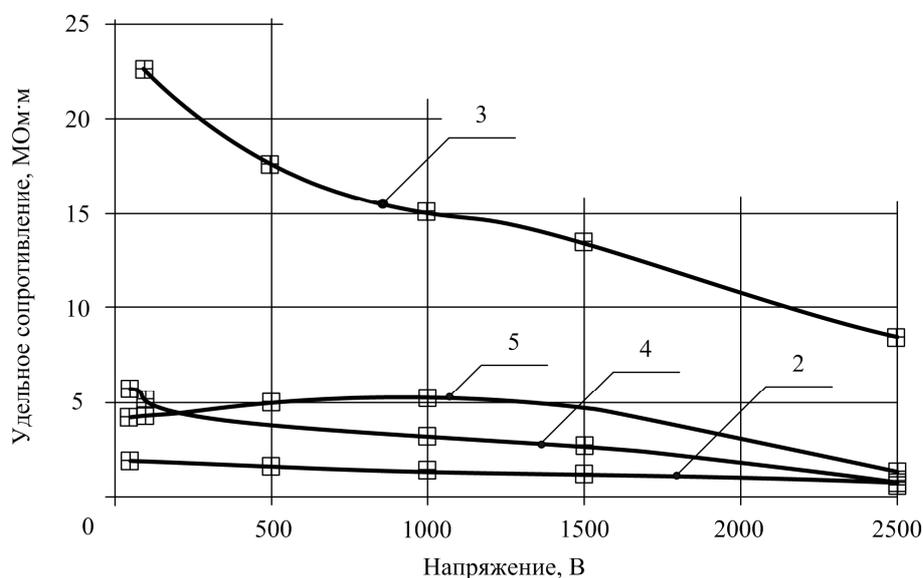


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления композитов оксида алюминия с гексаферритом бария от напряжения: 2 – 20 % Al_2O_3 + 80 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$; 3 – 40 % Al_2O_3 + 60 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$; 4 – 60 % Al_2O_3 + 40 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$; 5 – 80 % Al_2O_3 + 20 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

Таблица 3

Значения удельного сопротивления композитов оксида бора с гексаферритом бария при разном напряжении

№	Образец	D, мм	h, мм	Удельное сопротивление, МОм·м					
				50 В	100 В	500 В	1000 В	1500 В	2500 В
6	2 % B_2O_3 + 98 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	4,40	3,158	2,765	1,536	0,948	0,652	0,711
7	4 % B_2O_3 + 96 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	4,95	13,067	11,076	5,985	3,792	2,745	2,773
8	6 % B_2O_3 + 94 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	4,95	30,721	25,570	11,697	6,572	4,367	3,458
9	8 % B_2O_3 + 92 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	4,65	117,159	96,698	42,366	22,527	14,181	7,678
10	10 % B_2O_3 + 90 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	5,00	388,292	320,154	135,774	68,452	41,322	21,138
11	12 % B_2O_3 + 88 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	4,50	52,801	44,902	18,107	8,373	4,738	2,039
12	14 % B_2O_3 + 86 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	6,10	37,340	32,568	15,510	8,195	5,052	2,381
13	16 % B_2O_3 + 84 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	5,00	55,967	46,058	20,988	11,417	7,247	3,551
14	18 % B_2O_3 + 82 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	5,10	1,734	1,374	0,573	0,292	0,168	–
15	20 % B_2O_3 + 80 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	5,80	83,643	69,513	27,453	12,809	7,238	2,995
16	40 % B_2O_3 + 60 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	6,90	–	6125,275	856,446	345,810	190,630	105,486
17	60 % B_2O_3 + 40 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	20	8,70	–	–	23 643,839	17 533,471	14 335,724	10 112,966

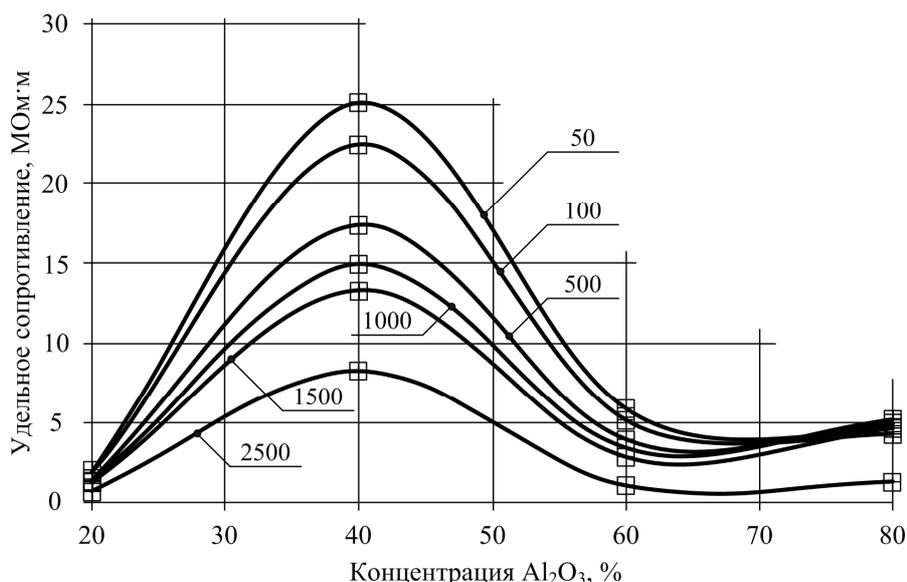


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления от концентрации Al_2O_3 (масс. %) в композите $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}\text{-Al}_2\text{O}_3$

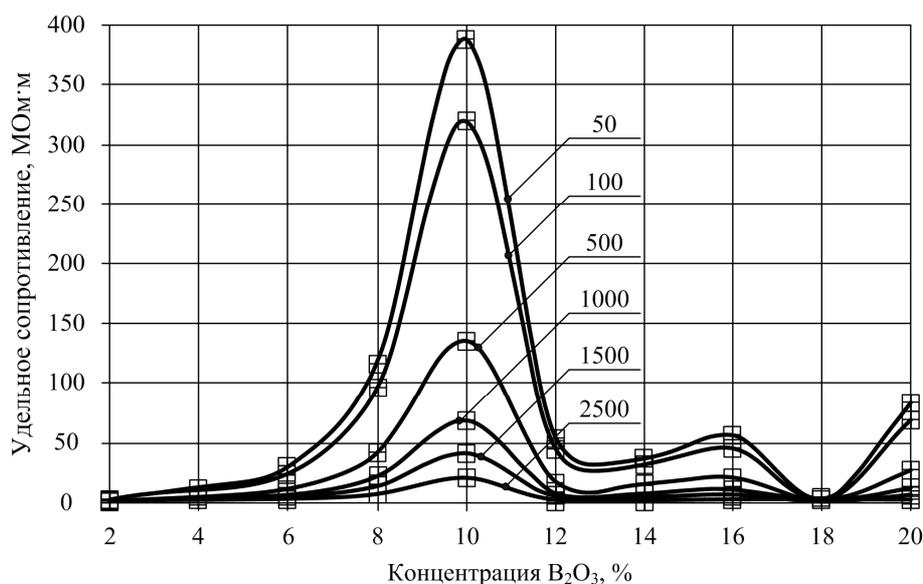


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления от концентрации B_2O_3 (масс. %) в композите $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}\text{-B}_2\text{O}_3$

Влияние концентрации оксида алюминия или оксида бора на величину удельного сопротивления представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что с точки зрения достижения максимального значения удельного сопротивления оптимальными составами данных композитов в некотором диапазоне являются: образцы № 3 (40 % Al_2O_3 + 60 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) в диапазоне концентраций Al_2O_3 от 20 до 80 % и № 10 (10 % B_2O_3 + 90 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) в диапазоне концентраций B_2O_3 от 2 до 20 %.

Композиты № 16 (40 % B_2O_3 + 60 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) и № 17 (60 % B_2O_3 + 40 % $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) не отражены на графике исходя из сверхвысоких значений удельного сопротивления, но являются наилучшими из всей линейки образцов $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}\text{-B}_2\text{O}_3$.

Заключение

В ходе эксперимента апробирована методика получения композитов на основе гексаферрита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с добавлением оксидов алюминия Al_2O_3 и бора B_2O_3 . Измерено сопротивление образцов при различных на-

пряжениях постоянного тока прибором МС-2500, построены зависимости удельного сопротивления от концентрации оксидов. Определены оптимальные составы с лучшими значениями удельного сопротивления для исследуемых композитов.

Литература

1. Паньков, В.В. Физико-химические процессы синтеза многокомпонентных оксидов для создания новых функциональных магнитных и проводящих материалов / В.В. Паньков // Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География. – 2011. – № 3. – С. 30–34.
2. Qiu, J. Crystal structure and magnetic properties of barium ferrite synthesized using GSPC and HEVM / J. Qiu, M. Gu // Journal of Alloys and Compounds. – 2005. – Vol. 415. – P. 209–212. DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.03.125
3. Effect of stoichiometry on the phase formation and magnetic properties BaFe₁₂O₁₉ nanoparticles by reverse micelle technique / P. Xu, X. Han, H. Zhao et al. // Materials Letters. – 2008. – Vol. 62, iss. 8–9. – P. 1305–1308. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.08.039
4. Ozgur, U. Microwave ferrites, part 1: fundamental properties / U. Ozgur, Y. Alivov, H. Morkoc // J. Mater. Sci. Mater. Electron. – 2009. – Vol. 20, iss. 9. – P. 789–834. DOI: 10.1007/s10854-009-9923-2
5. The influence of the microstructure parameters on the magnetic losses in soft magnetic ferrites for television engineering / A. Gonchar, S. Katynkina, L. Letyuk, I. Ryabov // J. Magn. Magn. Mater. – 2000. – Vol. 215–216. – P. 224–226. DOI: 10.1016/S0304-8853(00)00122-0
6. Townes, W.D. The Crystal Structure and Refinement of Ferromagnetic Barium Ferrite, BaFe₁₂O₁₉ / W.D. Townes, J.H. Fang, A.J. Perrotta // Zeitschrift fur Kristallographie. – 1967. – Vol. 125. – P. 437–449. DOI: 10.1524/zkri.1967.125.125.437
7. Rashad, M.M. Improvement of the magnetic properties of barium hexaferrite nanopowders using modified co-precipitation method / M.M. Rashad, I.A. Ibrahim // J. Magn. Magn. Mater. – 2011. – Vol. 323, iss. 16. – P. 2158–2164. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.03.023
8. Teh, G.B. Effect of annealing temperature on the structural, photoluminescence and magnetic properties of sol-gel derived Magnetoplumbite-type (M-type) hexagonal strontium ferrite / G.B. Teh, Y.C. Wong, R.D. Tilley // J. Magn. Magn. Mater. – 2011. – Vol. 323, iss. 17. – P. 2318–2322. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.04.014
9. Site preference and magnetic properties for a perpendicular recording material: BaFe_{12-x}Zn_{x/2}Zr_{x/2}O₁₉ nanoparticles / Z.W. Li, C.K. Ong, Z. Yang et al. // Phy. Rev. B. – 2000. – Vol. 62, no. 10. – P. 6530–6537. DOI: 10.1103/PhysRevB.62.6530
10. Bsoul, I. Preparation of Nanocrystalline BaFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉ by Ball Milling Method and Their Magnetic Properties / J. Ibrahim Bsoul // J. J. Phys. – 2009. – Vol. 2, no. 2. – P. 95–102.
11. Suriya, O. Improving magnetic properties of barium hexaferrites by La or Pr substitution / O. Suriya // Solid State Commun. – 2006. – Vol. 138, iss. 9. – P. 472–475. DOI: 10.1016/j.ssc.2006.03.020
12. Mallick, K.K. Magnetic properties of cobalt substituted M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation / K.K. Mallick, P. Shepherd, R.J. Green // J. Magn. Magn. Mater. – 2007. – Vol. 312, iss. 2. – P. 418–429. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.11.130
13. Magnetic properties of NiZr substituted barium ferrite / M.V. Rane, D. Bahadur, S.D. Kulkarni, S.K. Date. // J. Magn. Magn. Mater. – 1999. – Vol. 195, iss. 2. – P. L256–L260. DOI: 10.1016/S0304-8853(99)00041-4
14. Shams, M.H. Electromagnetic wave absorption characteristics of Mg-Ti substituted Ba-hexaferrite / M.H. Shams, S.M.A. Salehi, A. Ghasemi // Mater. Lett. – 2008. – Vol. 62, iss. 10–11. – P. 1731–1733. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.09.073
15. Винник, Д.А. Твердофазный синтез частично замещенного титаном гексаферрита бария BaFe_{12-x}Ti_xO₁₉ / Д.А. Винник, Д.С. Клыгач, А.С. Чернуха и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 28–33. DOI: 10.14529/met170304
16. Влияние базового состава и легирующих добавок на свойства гексаферритов / В.Г. Костишин, В.Г. Андреев, Д.Н. Читанов и др. // Журнал неорганической химии. – 2016. – Т. 61, № 3. – С. 294–299. DOI: 10.7868/S0044457X16030119

Стариков Андрей Юрьевич, инженер-исследователь, студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; starikov-andrey@mail.ru.

Живулин Владимир Евгеньевич, соискатель, инженер лаборатории монокристаллов НОЦ, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; zhivulinve@mail.ru.

Прокудин Александр Владимирович, ведущий инженер, старший преподаватель кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; prokudinav@susu.ru.

Сандер Елена Евгеньевна, студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vasia-ivanov-88@mail.ru.

Шерстюк Дарья Петровна, студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; daryasherstyuk77@gmail.com.

Винник Денис Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией роста кристаллов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vinnikda@susu.ru.

Поступила в редакцию 13 января 2019 г.

DOI: 10.14529/met190103

STUDY OF VOLT-OHMIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITES BASED ON BARIUM HEXAFERRITE

*A.Yu. Starikov, starikov-andrey@mail.ru,
V.E. Zhivulin, zhivulinve@mail.ru,
A.V. Prokudin, prokudinav@susu.ru,
E.E. Sander, vasia-ivanov-88@mail.ru,
D.P. Sherstyuk, daryasherstyuk77@gmail.com,
D.A. Vinnik, vinnikda@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

To date, the task of creating new, previously unknown materials, which will have the characteristics demanded in practice, remains relevant. This article presents the results of the study of magnetic materials that are in great demand in modern technologies.

One of the important characteristics of magnetic materials is electrical resistance. Since the electrical resistivity of magnetic materials mainly depends on their chemical composition, structure and method of preparation, the aim of the present study is to create a concentration range of composites and to study them, to select the preferred composition of materials based on barium hexaferrite for further study.

This paper presents the results of the preparation and study of composite materials based on barium hexaferrite $BaFe_{12}O_{19}$, which is known for the diversity of its functional characteristics. Important among them is the high value of electrical resistivity. To study the properties of such materials, a series of samples made by the method of two-stage solid-phase synthesis of barium hexaferrite with the addition of aluminum oxide Al_2O_3 and boron oxide B_2O_3 were prepared. The first stage is the synthesis of barium hexaferrite $BaFe_{12}O_{19}$ from barium carbonate $BaCO_3$ and iron oxide Fe_2O_3 (homogenization, compaction, sintering, grinding, powder classification). The second stage is the production of composite materials from powders of barium hexaferrite $BaFe_{12}O_{19}$, oxides of boron B_2O_3 or aluminum Al_2O_3 (homogenization, compaction, sintering). The addition of aluminum oxide Al_2O_3 and boron B_2O_3 , according to the authors, is capable of varying the properties of the composite over a wide range due to the difference in magnetic susceptibility and the dielectric constant of its components.

To measure the electrical resistance of the synthesized samples, the MIC-2500 device was used in a DC voltage range of 50–2500 V.

In this work, the dependences of the specific resistance on the concentration of oxides are plotted. The optimal compositions with the best values of resistivity for the composites under study were determined.

Keywords: barium ferrite, magnetic materials, composite materials, resistance.

References

1. Pankov V.V. [Physical and Chemical Processes of Synthesis of Multicomponent Oxides to Create New Functional Magnetic and Conducting Materials]. *Bulletin of the BSU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography*, 2011, no. 3, pp. 30–34. (in Russ.)
2. Qiu J., Gu M. Crystal Structure and Magnetic Properties of Barium Ferrite Synthesized Using GSPC and HEBM. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005, vol. 415, iss. 1–2, pp. 209–212. DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.03.125
3. Xu P., Han X., Zhao H. et. al. Effect of Stoichiometry on the Phase Formation and Magnetic Properties BaFe₁₂O₁₉ Nanoparticles by Reverse Micelle Technique. *Materials Letters*, 2008, vol. 62, iss. 8–9, pp. 1305–1308. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.08.039
4. Ozgur U., Alivov Y., Morkoc H. Microwave Ferrites, Part 1: Fundamental Properties. *J. Mater. Sci. Mater. Electron*, 2009, vol. 20, iss. 9, pp. 789–834. DOI: 10.1007/s10854-009-9923-2
5. Gonchar A., Katynkina S., Letyuk L., Ryabov I. The Influence of the Microstructure Parameters on the Magnetic Losses in Soft Magnetic Ferrites for Television Engineering *J. Magn. Magn. Mater.*, 2000, vol. 215–216, pp. 224–226. DOI: 10.1016/S0304-8853(00)00122-0
6. Townes W.D., Fang J.H., Perrotta A.J. The Crystal Structure and Refinement of Ferromagnetic Barium Ferrite, BaFe₁₂O₁₉. *Zeitschrift für Kristallographie*, 1967, vol. 125, pp. 437–449. DOI: 10.1524/zkri.1967.125.125.437
7. Rashad M.M., Ibrahim I.A. Improvement of the Magnetic Properties of Barium Hexaferrite Nanopowders Using Modified Co-precipitation Method. *J. Magn. Magn. Mater*, 2011, vol. 323, iss. 16, pp. 2158–2164. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.03.023
8. Teh G.B., Wong Y.C., Tilley R.D. Effect of Annealing Temperature on the Structural, Photoluminescence and Magnetic Properties of Sol–Gel Derived Magnetoplumbite-Type (M-type) Hexagonal Strontium Ferrite. *J. Magn. Magn. Mater*, 2011, vol. 323, iss. 17, pp. 2318–2322. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.04.014
9. Li Z.W., Ong C.K., Yang Z. et. al. Site Preference and Magnetic Properties for a Perpendicular Recording Material: BaFe_{12–x}Zn_{x/2}Zr_{x/2}O₁₉ Nanoparticles. *Phys. Rev. B.*, 2000, vol. 62, no. 10, pp. 6530–6537. DOI: 10.1103/PhysRevB.62.6530
10. Bsoul I. Preparation of Nanocrystalline BaFe_{12–2x}Co_xTi_xO₁₉ by Ball Milling Method and Their Magnetic Properties. *J. J. Phys.*, 2009, vol. 2, no. 2, pp. 95–102.
11. Suriya O. Improving Magnetic Properties of Barium Hexaferrites by La or Pr Substitution. *Solid State Commun.*, 2006, vol. 138, iss. 9, pp. 472–475. DOI: 10.1016/j.ssc.2006.03.020
12. Mallick K.K., Shepherd P., Green R.J. Magnetic Properties of Cobalt Substituted M-Type Barium Hexaferrite Prepared by Co-Precipitation. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2007, vol. 312, iss. 2, pp. 418–429. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.11.130
13. Rane M.V., Bahadur D., Kulkarni S.D., Date S.K. Magnetic Properties of NiZr Substituted Barium Ferrite. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1999, vol. 195, iss. 2, pp. L256–L260. DOI: 10.1016/S0304-8853(99)00041-4
14. Shams M.H., Salehu S.M.A., Ghasemi A. Electromagnetic Wave Absorption Characteristics of Mg–Ti Substituted Ba-Hexaferrite. *Mater. Lett.*, 2008, vol. 62, iss. 10–11, pp. 1731–1733. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.09.073
15. Vinnik D.A., Klygach D.S., Chernukha A.S., Zhivulin V.E., Galimov D.M., Starikov A.Yu., Reziyev A.V., Semyonov M.E., Vakhitov M.G. Solid-Phase Synthesis of Titanium Substituted Barium Hexaferrite BaFe_{12–x}Ti_xO₁₉. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 28–33. (in Russ.) DOI: 10.14529/met170304

16. Kostishin V.G. Andreev V.G. Chitanov D.N. et. al. Effects of Base Composition and Dopants on the Properties of Hexagonal Ferrites. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2016, vol. 61, iss. 3, pp. 279–283. DOI: 10.1134/S0036023616030116

Received 13 January 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Изучение вольт-омических характеристик композитов на основе гексаферрита бария / А.Ю. Стариков, В.Е. Живулин, А.В. Прокудин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 26–33. DOI: 10.14529/met190103

FOR CITATION

Starikov A.Yu., Zhivulin V.E., Prokudin A.V., Sander E.E., Sherstyuk D.P., Vinnik D.A. Study of Volt-Ohmic Characteristics of Composites Based on Barium Hexaferrite. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 26–33. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190103
