

УДК 544.778.4

СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОРТОФЕРРИТА ЛАНТАНА ДОПИРОВАННОГО БАРИЕМ

© 2019 г. М. В. Бережная^{a,*}, Н. С. Перов^b, О. В. Альмяшева^c, В. О. Миттова^d,
А. Т. Нгуен^e, И. Я. Миттова^a, Л. В. Дружинина^a, Ю. А. Алехина^b

^a Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, Воронеж, 394018 Россия
*e-mail: cnurova2010@yandex.ru

^b Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

^c Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

^d Воронежский государственный медицинский университет имени Н. Н. Бурденко, Воронеж, Россия

^e Университет имени Тон Дык Тханга, Хошимин, Вьетнам

Поступило в Редакцию 6 сентября 2018 г.

После доработки 6 сентября 2018 г.

Принято к печати 18 сентября 2018 г.

Методом совместного осаждения и последующего отжига при 1000°C синтезирован нанокристаллический феррит лантана, допированный барием. Установлена максимальная степень допирования $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_{3-x} = 0.1$ до появления других фаз. Введение катионов Ba^{2+} приводит к увеличению среднего размера кристаллитов от 25 ± 4 нм для $x = 0$ до 42 ± 4 нм для $x = 0.1$. Обнаружено образование частиц, характеризующихся сложной магнитной структурой, сочетающей два типа магнитного упорядочения. Синтезированные образцы $(1-x)\text{LaFeO}_3 \cdot x\text{Ba}^{2+}$ ($x = 0, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$) являются магнитно-жесткими материалами.

Ключевые слова: нанокристаллы, феррит лантана, барий, допирование, совместное осаждение

DOI: 10.1134/S0044460X19030193

Одним из приоритетных направлений развития современной науки и техники является создание новых магнитных материалов. Среди материалов, используемых для создания устройств хранения информации, интерес вызывают нанокристаллические ферриты со структурой перовскита [1–3]. Ортоферрит лантана привлекает особое внимание благодаря многообразию свойств материалов на его основе, что позволяет использовать их в качестве катализаторов, сенсоров, для изготовления устройств магнитной записи информации [3–5]. LaFeO_3 относится к классу слабых ферромагнитных материалов с интересными магнитными и магнитооптическими свойствами. Магнитную структуру ортоферритов обычно описывают двумя взаимопроникающими псевдокубическими гранецентрированными подрешетками, в которых каждый ион Fe^{3+} окружен шестью ионами O^{2-} . Это приводит к коллинеарному

расположению двух подрешеток, что обеспечивает антиферромагнитное упорядочение. Однако октаэдры FeO_6 могут наклоняться под различным углом, который зависит от радиуса иона редкоземельного элемента [6]. Смешанная ионно-электронная проводимость в LaFeO_3 обеспечивает линейный отклик на давление кислорода и обеспечивает возможность применения его в качестве газовых сенсоров [7]. Кроме того, наночастицы ортоферрита лантана и твердые растворы на его основе обнаруживают хорошие фотокаталитические свойства [8]. У частиц LaFeO_3 размером около 100 нм начинает проявляться спонтанная намагниченность. При этом в антиферромагнитных наночастицах часто с уменьшением размера фиксируется увеличение намагниченности, благодаря наличию нескомпенсированных поверхностных спинов [9, 10]. Особое внимание уделяют изучению магнитных свойств

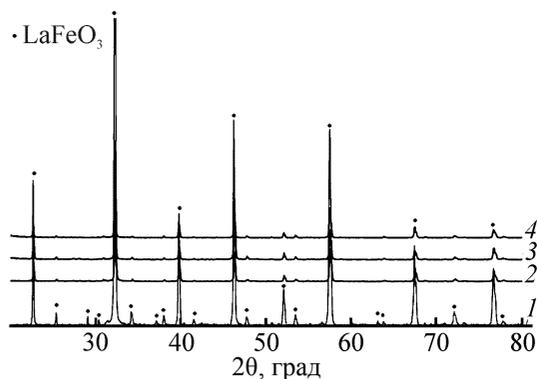


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы порошков номинального состава $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$, полученных методом совместного осаждения, после отжига при 1000°C в течение 60 мин. $x = 0$ (1), 0.05 (2), 0.075 (3), 0.1 (4).

ортоферрита лантана, допированного различными катионами. Например, показано, что замещение ионов Fe^{3+} катионами Cr^{3+} в решетке LaFeO_3 усиливает обменное взаимодействие антиферромагнетик–ферромагнетик в структуре феррита, что вызывает немонотонное изменение намагниченности и коэрцитивной силы наночастиц, синтезированных цитратным методом [11]. Введение допантов вызывает искажение кристаллической решетки, изменение размера кристаллитов, возникновение дефектов и изменение заряда иона железа в случае разновалентного замещения. Перечисленные факторы могут существенным образом повлиять на магнитные свойства нанокристаллов.

В работе [12] описаны особенности формирования гетеровалентных твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{M}_x\text{FeO}_3$ (где $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) механохимическим методом. По результатам рентгенофазового анализа установлен переход ромбической модификации в кубическую для образцов $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_3$ при $x \approx 0.3$. Анализ поликристаллов $\text{La}_{1-x}\text{M}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ показал наличие слабосвязанной формы кислорода, локализованной в регулярной структуре перовскита. Синтез образцов феррита лантана, допированного барием, золь-гель методом осуществлен авторами [13], что подтверждает возможность образования твердых растворов, несмотря на большую разницу ионных радиусов. Однако магнитные свойства полученных материалов не исследовали.

В настоящее время для получения нанокристаллических ортоферритов используется большое разнообразие методик, например,

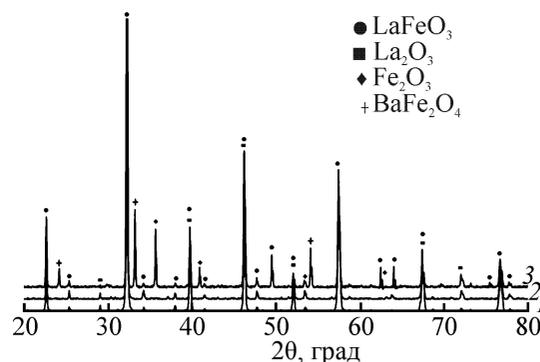


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы порошков номинального состава $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$, полученных методом совместного осаждения, после отжига при 1000°C в течение 60 мин. $x = 0.15$ (1), 0.2 (2), 0.25 (3).

механохимический, гидротермальный синтез, золь-гель технология и др. [14–18]. Как показано в работе [19], свойства наночастиц, в том числе и магнитные, зависят не только от их состава, кристаллической структуры и размеров, но и от способов получения, определяющих более тонкие особенности их строения. Особое место занимают различные варианты золь-гель метода, позволяющие при относительно низких температурах формировать наноструктуры с узким распределением частиц по размерам. Однако с точки зрения определения оптимальных условий формирования нанокристаллов сложного катионного состава, золь-гель технология недостаточно изучена.

В настоящей работе рассматриваются синтез и магнитные свойства нанокристаллов на основе ортоферрита лантана, формирование которых является важным этапом в изготовлении функциональных материалов, устанавливается влияние допирования катионами Ba^{2+} на размер и характеристики наночастиц.

Как можно заключить на основании результатов рентгеновской дифрактометрии (рис. 1), образцы $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$ ($x = 0, 0.05, 0.075, 0.1$), синтезированные методом совместного осаждения с последующим термическим отжигом при 1000°C в течение 1 ч, представляют собой однофазный материал со структурой ортоферрита лантана LaFeO_3 (номер карты 15-0148 [20]). Увеличение содержания допанта приводит к выделению примесных фаз. На дифрактограммах образцов с номинальной степенью допирования $x = 0.15, 0.2, 0.25$ помимо пиков фазы со структурой ортоферрита лантана LaFeO_3 (номер карты 15-0148

Таблица 1. Параметры элементарных ячеек нанокристаллов $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$, синтезированных методом соосаждения, после отжига при 1000°C в течение 60 мин

Параметры ячейки, Å	x			
	0	0.05	0.075	0.1
a	5.538	5.546	5.548	5.552
b	5.543	5.546	5.549	5.551
c	7.839	7.860	7.852	7.858
$V, \text{Å}^3$	240.634	241.774	241.796	242.245

Таблица 2. Результаты локального рентгеноспектрального микроанализа образцов $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$, синтезированных методом соосаждения, после отжига при 1000°C в течение 60 мин

Номинальный состав образцов, x	Элементный состав, ат %				Реальный состав образцов, x
	La	Ba	Fe	O	
0.05	21.65±0.92	0.41±0.97	22.53±1.02	55.41±1.49	0.03
0.075	21.18±0.92	1.21±0.96	22.11±1.04	55.39±1.48	0.07
0.1	19.96±0.91	1.65±0.97	22.20±1.03	56.18±1.49	0.08

[20]) присутствуют пики, отвечающие следующим фазам: La_2O_3 (номер карты 05-0602), BaFe_2O_4 (номер карты 46-0113), Fe_2O_3 (номер карты 39-1346 [20]) (рис. 2). Таким образом, по результатам рентгенофазового анализа (РФА) установлен максимальный предел допирования феррита лантана барием, $x = 0.1$.

Расчет параметров элементарной ячейки по данным дифрактометрии показал, что увеличение степени допирования приводит к возрастанию объема элементарной ячейки (табл. 1). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о встраивании катионов Ba^{2+} в решетку феррита лантана, о чем свидетельствует образование однофазных образцов по данным РФА. Узкая область гомогенности и увеличение объема элементарной ячейки вызвано введением катиона, значительно превышающего ионный радиус лантана ($\Delta r = 18.3\%$) [21].

Определение элементного состава показало, что отклонение от заданной при синтезе стехиометрии в образцах находится в пределах погрешности метода (табл. 2). Анализ размеров кристаллитов, определенных по формуле Шеррера [22] по данным рентгеновской дифрактометрии, показал увеличение $D_{\text{ср}}$ при введении катионов Ba^{2+} в решетку феррита лантана (табл. 3).

Как следует из данных просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), наночастицы феррита лантана, допированного барием, синтезированные с использованием водного раствора карбоната натрия в качестве осадителя, и подвергнутые отжигу при 1000°C в течение 60 мин, с номинальной степенью допирования $x = 0, 0.05, 0.075, 0.1$ характеризуются преимущественно округлой формой частиц в широком диапазоне размеров. На ПЭМ-изображении присутствуют как небольшие частицы с диаметром порядка 10 нм,

Таблица 3. Магнитные характеристики однофазных образцов $(1-x)\text{LaFeO}_3: x\text{Ba}^{2+}$ (осадитель – карбонат натрия, отжиг при 1000°C , 60 мин), измеренные при 300 и 100 К в поле 1250 кА/м

Номинальный состав, x	ОКР, нм	$J, \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$		$H_c, \text{кА/м}$	
		300 К	100 К	300 К	100 К
0	25±4	0.265	0.157	300	–
0.05	36±3	0.109	0.123	–	–
0.075	38±3	1.837	2.277	275	220
0.1	42±4	1.290	1.650	90	87

так и достаточно крупные частицы с $D_{\text{ср}}$ от 100 до 200 нм.

Измерение магнитных характеристик осуществляли при 300 и 100 К в максимальном поле 1250 кА/м. Образец LaFeO_3 (осадитель – Na_2CO_3 , отжиг при 1000°C в течение 1 ч) при комнатной температуре характеризуется широкой петлей гистерезиса с $H_c = 300$ кА/м, а при охлаждении пробы наблюдается понижение удельной намагниченности и коэрцитивной силы (рис. 3). На температурной зависимости намагниченности отмечается фазовый переход антиферромагнетик–ферромагнетик. Аналогичная форма петли при 300 К для порошка LaFeO_3 наблюдалась в работе [16].

На температурных зависимостях образцов $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$ ($x = 0, 0.05, 0.075$) в области 250 К наблюдается фазовый переход, связанный с переориентацией спинов магнитоактивных ионов от одной кристаллической оси к другой. Величина T этого перехода уменьшается по мере увеличения содержания бария.

Исследование магнитных свойств наночастиц состава $0.9\text{LaFeO}_3:0.1\text{Ba}^{2+}$ при 300 и 100 К обнаружило снижение значений H_c и J по сравнению с образцом состава $0.925\text{LaFeO}_3:0.075\text{Ba}^{2+}$ при сохранении ферромагнитного характера материала (рис. 4а). Похожее изменения наблюдались в случае допирования феррита иттрия катионами бария для $x = 0.1$ [23]. Такое поведение можно объяснить существованием двух магнитных подрешеток: магнитно-мягкой и магнитно-жесткой при сохранении однофазности продукта.

Дальнейшее увеличение количества вводимого допанта приводит к формированию смеси,

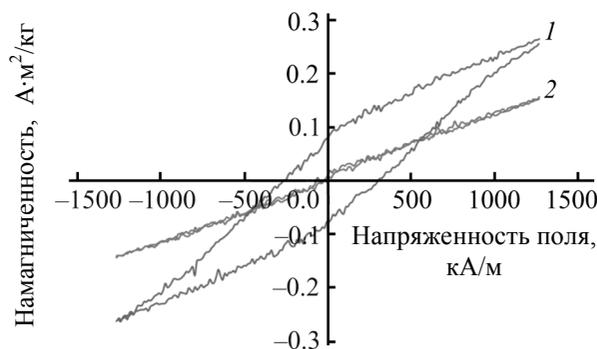


Рис. 3. Полевая зависимость намагниченности образца номинального состава LaFeO_3 при 300 (1) и 100 К (2).

содержащей помимо ортоферрита лантана примеси оксидов лантана, железа(III) и феррита бария. Это вызывает значительное усиление ферромагнетизма. Скачок намагниченности при уменьшении температуры измерения обусловлен присутствием $\text{BaFe}_2\text{O}_4, \text{Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 4б).

Нанопорошки $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$ характеризуются широким диапазоном магнитных характеристик в зависимости от содержания допанта (табл. 3, 4). Введение катионов бария в решетку феррита лантана приводит к формированию материала со сложной магнитной структурой. Сложность интерпретации магнитных свойств наночастиц обусловлена разбросом частиц по размерам и взаимодействиями между кристаллитами. Однако, можно предположить, что изменение характеристик синтезированных образцов обусловлено несколькими потенциальными причинами. Во-первых, гетеровалентное замещение катионов La^{3+} двухзарядными ионами Ba^{2+} вызывает переход $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{4+}$. Во-вторых, возникающее вследствие разницы ионных

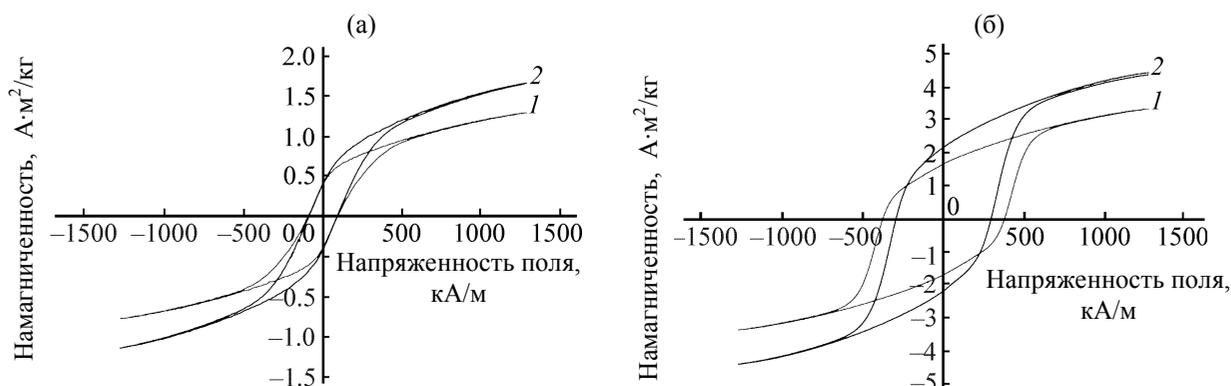


Рис. 4. Полевые зависимости намагниченности образцов номинального состава $0.9\text{LaFeO}_3:0.1\text{Ba}^{2+}$ (а) и $0.75\text{LaFeO}_3:0.25\text{Ba}^{2+}$ (б) при 300 (1) и 100 К (2).

Таблица 4. Магнитные характеристики многофазных образцов $(1-x)\text{LaFeO}_3 \cdot x\text{Ba}^{2+}$ (осадитель – карбонат натрия, отжиг при 1000°C , 60 мин), измеренные при 300 и 100 К в поле 1250 кА/м

Номинальный состав, x	J , А·м ² /кг		H_c , кА/м	
	300 К	100 К	300 К	100 К
0.15	0.346	0.370	32	26
0.20	3.416	4.406	318	230
0.25	3.355	4.455	380	290

радиусов $r(\text{Ba}^{2+}) > r(\text{La}^{3+})$ искажение кристаллической решетки может влиять на угол и длины связей Fe–O–Fe, а следовательно, и на силу обменного взаимодействия. В-третьих, уменьшение размера частиц приводит к изменению доли поверхностных атомов [24–26].

Таким образом, синтезированные наночастицы феррита лантана, допированного барием, характеризуются разнообразием магнитных свойств в зависимости от степени допирования, прежде всего, от возможности вхождения в решетку ортоферрита лантана или образования примесных фаз, что позволяет использовать их в различных областях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика синтеза нанопорошков феррита лантана основана на методике, описанной в работе [27]. К 350 мл кипящей воды при перемешивании прибавляли 50 мл эквимольной смеси растворов 0.05 М. $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ и 0.05 М. $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$. Полученный золь охлаждали до комнатной температуры, при этом он приобретал красно-коричневый цвет, сохранявшийся при охлаждении. К системе при перемешивании (3000 об/мин) по каплям добавляли осадитель (карбонат натрия) в количестве, необходимом для полного осаждения катионов La^{3+} и Fe^{3+} . Осажденные гидроксиды перемешивали в течение 10–15 мин. После отделения на вакуум-фильтре осадки промывали несколько раз дистиллированной водой и сушили при комнатной температуре до постоянной массы. Полученные осадки прокаливали в муфельной печи при 1000°C в течение 1 ч.

Фазовый состав определяли методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометрах Empyrean, Thermo ARL X'tra, RIGAKU SmartLab III. Количественный элементный анализ выпол-

няли на растровом электронном микроскопе JSM-6380LV с системой энергодисперсионного микроанализа INCA 250. Размер частиц определяли с помощью электронного микроскопа Carl Zeiss LIBRA 120, а также методом рентгеновской дифрактометрии с использованием уширения линий рентгеновской дифракции и формулы Шеррера. Намагниченность и коэрцитивную силу определяли с помощью магнитометра VSM Lakeshore, модель 7404 с вибрирующим образцом.

Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета и кафедры магнетизма Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang M., Wang T., Song S., Ravi M., Liu R., Ji S. // *Ceram. Int.* 2017. Vol. 43. 10270. doi 10.1016/J.CERAMINT.2017.05.056
2. Dho J., Blamire M. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 87. N 25. P. 252504. doi 10.1063/1.2147717
3. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. // *Mater. Sci. Eng. (B)*. 2017. Vol. 215. P. 37. doi 10.1016/j.mseb.2016.11.002
4. Markova-Velichkova M., Lazarova T., Tumbalev V., Ivanov G., Kovacheva D., Stefanov P., Naydenov A. // *Chem. Eng. J.* 2013. Vol. 231. P. 236. doi 10.1016/j.cej.2013.07.029
5. Ремпель А.А. // *Усп. хим.* 2007. Т. 76. № 5. С. 474; Rempel A.A. // *Russ. Chem. Rev.* 2007. Vol. 76. N 5. P. 435. doi 10.1070/RC2007v076n05ABEH003674
6. Башкиров Ш.Ш., Либерман В.Б., Синявский В.И. *Магнитная микроструктура ферритов.* Изд. Казанск. унив., 1978. 182 с.
7. Jaouali I., Hamrouni H., Moussa N., Nsib M.F., Centeno M.A., Bonavita A., Neri G., Leonardi S.G. // *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44. N 4. P. 4183. doi 10.1016/j.ceramint.2017.11.221
8. Phan T.T.N., Nikoloski A.N., Bahri P.A., Li D. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. Vol. 6. N 1. P. 1209. doi 10.1016/j.jece.2018.01.033
9. Шеин И.П., Шеин К.И., Кожевников В.Л., Ивановский А.Л. // *Физика твердого тела.* 2005. Т. 47. № 11.

- C. 1998; *Shein I.R., Shein K.I., Kozhevnikov V.L., Ivanovskii A.L.* // *Phys. Solid State*. 2005. Vol. 47. N 11. P. 2082. doi 10.1134/1.2131149
10. *Eibschütz M., Shtrikman S., Trevez D.* // *Phys. Rev.* 1967. Vol. 156. N 2. P. 562. doi 10.1103/PhysRev.156.562
 11. *Selvadurai A.P.B., Pazhanivelu V., Jagadeeshwaran C., Murugaraj R., Muthuselvam I.P., Chou F.C.* // *J. Alloys Compd.* 2015. P. 1. doi 10.1016/j.jallcom.2015.05.213
 12. *Исупова Л.А., Надеев А.Н., Яковлева И.С., Цыбуля С.В.* // *Журнал кинетики и катализа*. 2008. Т. 49. № 1. С. 142.
 13. *Sun L., Qin H., Wang K., Zhao M., Hu J.* // *Mater. Chem. Phys.* 2011. Vol. 125. P. 305. doi 10.1016/j.matchemphys.2010.09.052
 14. *Kolb E.D.* // *J. Appl. Phys.* 1968. Vol. 39. N 2. P. 1362. doi 10.1063/1.1656305
 15. *Nguyen T.T., Dang L.M.* // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2012. Article ID 380306. P. 1. doi 10.1155/2012/380306
 16. *Köferstein R., Jäger L., Ebbinghaus S.G.* // *Solid State Ionics*. 2013. Vol. 249–250. P. 1. doi 10.1016/j.ssi.2013.07.001
 17. *Bachina A., Ivanov V.A., Popkov V.I.* // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2017. Vol. 8. N 5. P. 647. doi 10.17586/2220-8054-2017-8-5-647-653
 18. *Морозов М.И., Ломанова Н.А., Гусаров В.В.* // *ЖОХ*. 2003. Т. 73. № 11. С. 1772; *Morozov M.I., Lomanova N.A., Gusarov V.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2003. Vol. 73. N 11. P. 1676. doi 10.1023/B:RUGC.0000018640.30953.70
 19. *Popkov V.I., Almjashaeva O.V., Semenova A.S., Kellerman D.G., Nevedomskiy V.N., Gusarov V.V.* // *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2017. Vol. 28. N 10. P. 7163. doi 10.1007/s10854-017-6676-1
 20. JCPDC PCPDFWIN: A Windows Retrieval/Display program for Accessing the ICDD PDF-2 Data base, International Centre for Diffraction Data. 1997.
 21. *Shannon R.D.* // *Acta Crystallogr. (A)*. 1976. Vol. 32. P. 751. doi 10.1107/S0567739476001551
 22. *Patterson A.* // *Phys. Rev.* 1939. Vol. 56. P. 978. doi 10.1103/PhysRev.56.978
 23. *Бережная М.В., Альмяшева О.В., Миттова В.О., Нгуен А.Т., Миттова И.Я.* // *ЖОХ*. 2018. Т. 88, № 4. С. 539; *Berezhnaya M.V., Almyasheva O.V., Mittova V.O., Nguyen A.T., Mittova I.Ya.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88, № 4. P. 626. doi 10.1134/S1070363218040035
 24. *Белов К.П.* Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 160 с.
 25. *Тугова Е.А., Попова В.Ф., Зверева И.А., Гусаров В.В.* // *ЖОХ*. 2007. Т. 77. № 6. С. 887; *Tugova E.A., Popova V.F., Zvereva I.A., Gusarov V.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2007. Vol. 77. N 6. P. 979. doi 10.1134/S1070363207060023
 26. *Тугова Е.А., Бобрышева Н.П., Селютин А.А., Гусаров В.В.* // *ЖОХ*. 2008. Т. 78. № 11. С. 1764; *Tugova E.A., Bobrysheva N.P., Selyutin A.A., Gusarov V.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2008. V. 78. N 11. P. 2000. doi 10.1134/S1070363208110029
 27. *Нгуен А.Т., Миттова И.Я., Альмяшева О.В., Кириллова С.А., Гусаров В.В.* // *Физика и химия стекла*. 2008. Т. 34. № 6. С. 992; *Tien N.A., Mittova I.Ya., Almjashaeva O.V., Kirillova S.A., Gusarov V.V.* // *Glass Phys. Chem.* 2008. Vol. 34. N 6. P. 756. doi 10.1134/S1087659608060138

Synthesis and Magnetic Properties of Barium-Doped Nanocrystal Lanthanum Orthoferrite

M. V. Berezhnaya^{a*}, N. S. Perov^b, O. V. Almjashaeva^c, V. O. Mittova^d,
A. T. Nguyen^e, I. Ya. Mittova^a, L. V. Druzhinina^a, and Yu. A. Alekhina^b

^a Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394018 Russia

*e-mail: cnurova2010@yandex.ru

^b M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^c St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

^d Voronezh State Medical University named after N. N. Burdenko, Voronezh, Russia

^e Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam

Received September 6, 2018; revised September 6, 2018; accepted September 18, 2018

Barium-doped nanocrystalline lanthanum ferrite was synthesized by the method of co-precipitation and subsequent annealing at 1000°C. The maximum degree of doping of $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_{3-x}$ ($x = 0.1$) was established before the appearance of other phases. The introduction of Ba^{2+} cations leads to an increase in the average crystallite size from 25 ± 4 nm for $x = 0$ to 42 ± 4 nm for $x = 0.1$. The formation of particles characterized by a complex magnetic structure combining two types of magnetic ordering was found. The synthesized samples of $(1-x)\text{LaFeO}_3 \cdot x\text{Ba}^{2+}$ ($x = 0, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$) are magnetically hard materials.

Keywords: nanocrystals, lanthanum ferrite, barium, doping, co-precipitation