

УДК 544.778.4

# СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОРТОФЕРРИТА ЛАНТАНА ДОПИРОВАННОГО БАРИЕМ

© 2019 г. М. В. Бережная<sup>a,\*</sup>, Н. С. Перов<sup>b</sup>, О. В. Альмяшева<sup>c</sup>, В. О. Миттова<sup>d</sup>,  
А. Т. Нгуен<sup>e</sup>, И. Я. Миттова<sup>a</sup>, Л. В. Дружинина<sup>a</sup>, Ю. А. Алехина<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, Воронеж, 394018 Россия  
\*e-mail: cnurova2010@yandex.ru

<sup>b</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

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

<sup>d</sup> Воронежский государственный медицинский университет имени Н. Н. Бурденко, Воронеж, Россия

<sup>e</sup> 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.

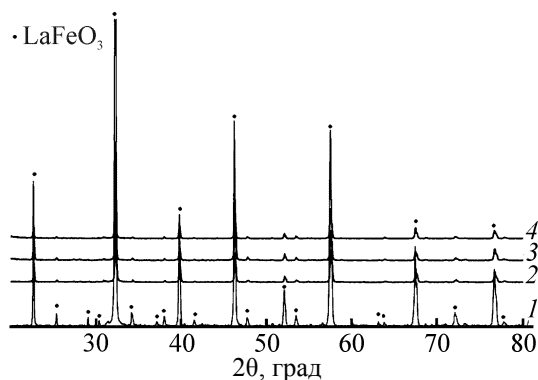
Методом совместного осаждения и последующего отжига при 1000°C синтезирован нанокристаллический феррит лантана, допированный барием. Установлена максимальная степень допирования  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_{3-x} = 0.1$  до появления других фаз. Введение катионов  $\text{Ba}^{2+}$  приводит к увеличению среднего размера кристаллитов от  $25 \pm 4$  нм для  $x = 0$  до  $42 \pm 4$  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].  $\text{LaFeO}_3$  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  $\text{Fe}^{3+}$  окружен шестью ионами  $\text{O}^{2-}$ . Это приводит к коллинеарному

расположению двух подрешеток, что обеспечивает антиферромагнитное упорядочение. Однако октаэдры  $\text{FeO}_6$  могут наклоняться под различным углом, который зависит от радиуса иона редкоземельного элемента [6]. Смешанная ионно-электронная проводимость в  $\text{LaFeO}_3$  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  $\text{LaFeO}_3$  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

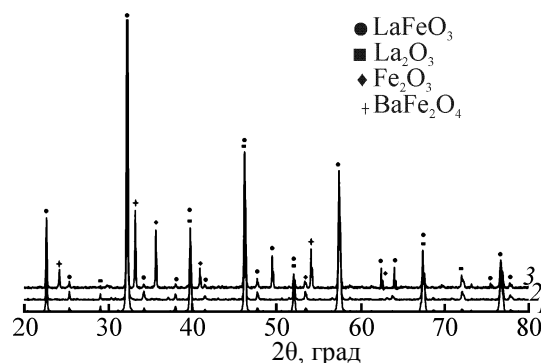


**Рис. 1.** Рентгеновские дифрактограммы порошков номинального состава  $(1-x)\text{LaFeO}_3:x\text{Ba}^{2+}$ , полученных методом совместного осаждения, после отжига при  $1000^\circ\text{C}$  в течение 60 мин.  $x = 0$  (1), 0.05 (2), 0.075 (3), 0.1 (4).

ортоферрита лантана, допированного различными катионами. Например, показано, что замещение ионов  $\text{Fe}^{3+}$  катионами  $\text{Cr}^{3+}$  в решетке  $\text{LaFeO}_3$  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  $1000^\circ\text{C}$  в течение 60 мин. 1 –  $x = 0.15$  (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  $\text{Ba}^{2+}$  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  $1000^\circ\text{C}$  в течение 1 ч, представляют собой однофазный материал со структурой ортоферрита лантана  $\text{LaFeO}_3$  (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  $\text{LaFeO}_3$  (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  $1000^\circ\text{C}$  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  $1000^\circ\text{C}$  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:  $\text{La}_2\text{O}_3$  (номер карты 05-0602),  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$  (номер карты 46-0113),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (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  $\text{Ba}^{2+}$  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  $\text{Ba}^{2+}$  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  $1000^\circ\text{C}$  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  $1000^\circ\text{C}$ , 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  $D_{ср}$  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  $(1-x)LaFeO_3 \cdot xBa^{2+}$  ( $x = 0, 0.05, 0.075$ ) 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  $0.9LaFeO_3 \cdot 0.1Ba^{2+}$  при 300 и 100 К обнаружило снижение значений  $H_c$  и  $J$  по сравнению с образцом состава  $0.925LaFeO_3 \cdot 0.075Ba^{2+}$  при сохранении ферромагнитного характера материала (рис. 4а). Похожие 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,

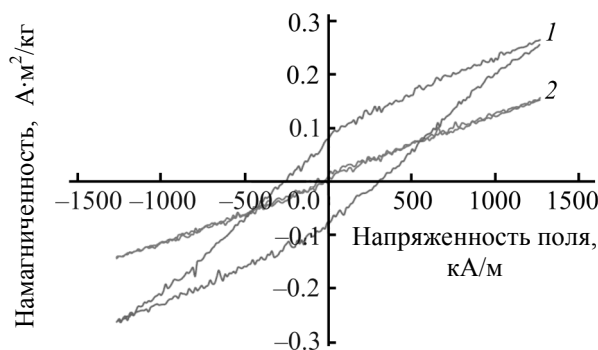


Рис. 3. Полевая зависимость намагниченности образца номинального состава  $LaFeO_3$  при 300 (1) и 100 К (2).

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  $BaFe_2O_4, Fe_2O_3$  (рис. 4б).

Нанопорошки  $(1-x)LaFeO_3 \cdot xBa^{2+}$  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  $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{4+}$ . Во-вторых, возникающее вследствие разницы ионных

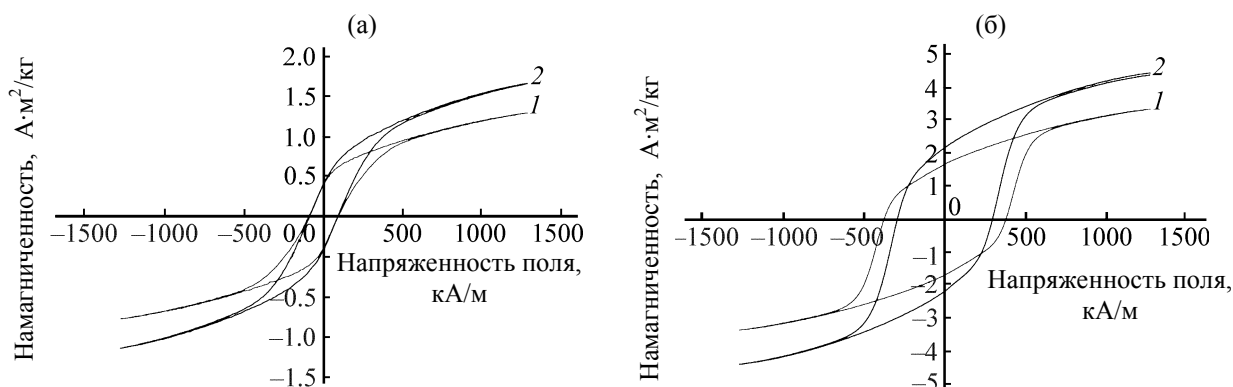


Рис. 4. Полевые зависимости намагниченности образцов номинального состава  $0.9LaFeO_3 \cdot 0.1Ba^{2+}$  (а) и  $0.75LaFeO_3 \cdot 0.25Ba^{2+}$  (б) при 300 (1) и 100 К (2).

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

Номинальный состав, $x$	$J$ , А·м <sup>2</sup> /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  $\text{La}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . 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  $1000^\circ\text{C}$  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. Шейн И.П., Шейн 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., Al'myashaeva 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<sup>a\*</sup>, N. S. Perov<sup>b</sup>, O. V. Almjashaeva<sup>c</sup>, V. O. Mittova<sup>d</sup>,  
A. T. Nguyen<sup>e</sup>, I. Ya. Mittova<sup>a</sup>, L. V. Druzhinina<sup>a</sup>, and Yu. A. Alekhina<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394018 Russia

\*e-mail: cnurova2010@yandex.ru

<sup>b</sup> M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>c</sup> St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

<sup>d</sup> Voronezh State Medical University named after N. N. Burdenko, Voronezh, Russia

<sup>e</sup> 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  $\text{Ba}^{2+}$  cations leads to an increase in the average crystallite size from  $25 \pm 4$  nm for  $x = 0$  to  $42 \pm 4$  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