ЖУРНАЛ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ, 2017, том 62, № 3, с. 275–282

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 542.06:546.654'47'72

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДОПИРОВАНИЯ НА РАЗМЕР И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ La_{1 – x}Zn_xFeO₃, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

© 2017 г. М. В. Кнурова*, И. Я. Миттова*, Н. С. Перов**, О. В. Альмяшева***, А. Т. Нгуен****, В. О. Миттова*****, В. В. Бессалова**, Е. Л. Вирютина*

> *Воронежский государственный университет, Россия, 394018 Воронеж, Университетская пл., 1 **Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2 ***Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия, 19737, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5

****Хошиминский государственный педагогический университет, Вьетнам, Хошимин, ул. Ан Зыонг Выонг, 280

****Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко, Россия,

394036 Воронеж, ул. Студенческая, 10

E-mail: cnurova2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.12.2015 г.

Золь–гель методом синтезированы нанопорошки La_{1 – x}Zn_xFeO₃ (номинальная степень допирования $x_{\text{ном}} = 0, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4$) с использованием в качестве осадителя водного раствора аммиака, отожженные при температуре 950°C в течение 60 мин. По результатам РФА и ЛР-СМА определен максимальный реальный предел допирования феррита лантана цинком: x = 0.072. Установлена немонотонная зависимость размера частиц от содержания Zn²⁺. Измерены магнитные характеристики (удельная намагниченность *J*, коэрцитивная сила H_c , магнитная восприимчивость χ) образцов при температурах 300 и 100 K в полях до 1300 кА/м. Показано, что при увеличении степени допирования *J* повышается от 0.188 (для x = 0) до 0.245 A м²/кг (x = 0.072), а χ немонотонно изменяется от 11.5 × 10⁻⁶ (x = 0) до 15.3 × 10⁻⁶ (x = 0.072) (при температуре 300 K). При понижении температуры измерения до 100 K намагниченность и восприимчивость монотонно возрастают.

Ключевые слова: нанопорошки, феррит лантана, допирование, золь—гель синтез, парамагнетики. **DOI:** 10.7868/S0044457X17030084

Оксидные соединения типа перовскита, например LaFeO₃, имеют широкое применение в различных областях, таких как изготовление твердооксидных топливных элементов, катализаторов, магнитных материалов, химических сенсоров, электродов и др. [1-4].

Феррит лантана является одним из наиболее простых ферромагнетиков со структурой перовскита. В литературе [5, 6] приведен механохимический способ получения нанопорошков феррита лантана. Основными недостатками этого метода синтеза порошков системы La_2O_3 —Fe₂O₃ по сравнению с золь—гель методом являются большая затрата времени (24 ч) при высокой температуре и сложная аппаратура для осуществления синтеза. В [7, 8] описан золь—гель метод синтеза LaFeO₃, где в качестве осадителя был выбран водный раствор аммиака, проведено допирование феррита лантана кальцием и стронцием. Установлено, что введение катионов допанта в решетку феррита обусловливает увеличение среднего диаметра кристаллитов от 30 нм для LaFeO₃ до 50 нм для La_{0.7}Ca_{0.3}FeO₃ и до 70 нм для La_{0.7}Sr_{0.3}FeO₃. Допирование катионами кальция и стронция приводит к увеличению коэрцитивной силы и удельной намагниченности образцов [7, 8]. Изменение магнитных свойств феррита лантана при допировании двухзарядными катионами вызвано частичным переходом Fe^{3+} в Fe^{4+} , а также искажением кристаллической решетки из-за разницы ионных радиусов La³⁺ и допанта. Соотношение ионных радиусов представлено в табл. 1. При равном содержании катионов Ca²⁺ и Sr²⁺ в составе образцов магнитные свойства различаются: H_c (La_{0.7}Ca_{0.3}FeO₃) $\leq H_c$ (La_{0.7}Sr_{0.3}FeO₃), а $J(La_{0.7}Ca_{0.3}FeO_3) > J(La_{0.7}Sr_{0.3}FeO_3).$

Следовательно, значительную роль в изменении H_c и J играет искажение кристаллической ре-

Катион	Ионный радиус по Гольдшмидту (Å) [9]	Соотношение с ионным радиусом лантана по правилу Гольдшмидта (%)		
La ³⁺	1.04	—		
Sr ²⁺	1.18	13.5		
Ca ²⁺	1.00	4.0		
Zn^{2+}	0.74	40.5		

Таблица 1. Соотношение ионных радиусов элементов

шетки: при увеличении ионного радиуса допанта коэрцитивная сила увеличивается, а удельная намагниченность уменьшается. Таким образом, можно ожидать, что допирование ортоферрита лантана катионами цинка, радиус которых значительно меньше радиуса лантана, приведет к уменьшению H_c и увеличению J.

Имеющиеся в литературе данные о влиянии цинка на размер нанокристаллов и магнитные свойства нанопорошков LaFeO₃ весьма противоречивы [10–13].

В связи с этим целью данной работы стал золь—гель синтез и исследование нанокристаллов $La_{1-x}Zn_xFeO_3$: определение фазового и элементного состава, среднего диаметра кристаллитов, удельной намагниченности и магнитной восприимчивости образцов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных веществ в работе использовали следующие реактивы: нитрат железа(III) 9-водный $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O(x. ч.)$, хлорид лантана 7-водный $LaCl_3 \cdot 7H_2O(x. ч.)$, нитрат цинка 6-водный $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O(x. ч.)$, осадитель — водный раствор аммиака $NH_4OH(ч. д. a.)$ (8 мас. %, $\rho = = 0.965$ г/мл), дистиллированная вода.

В связи с тем что гидроксид цинка обладает амфотерными свойствами, процесс его осаждения требует контроля pH. В [14] описан золь-гель синтез ZnO, Fe₂O₃, ZnFe₂O₄ и показано, что осаждение гидроксида цинка происходит при pH 9. Использование в качестве осадителя водного раствора аммиака за счет образования буферной смеси (NH⁺₄ и NH₄OH) позволяет поддерживать pH на определенном уровне – 9.24. Таким образом, согласно литературным данным, для совместного осаждения катионов La³⁺, Fe³⁺ и Zn²⁺ в качестве осадителя был выбран водный раствор аммиака в количестве, необходимом для полного осаждения и достижения pH 9.

Синтезированные образцы La_{1-x}Zn_xFeO₃ исследовали следующими методами: установление фазового состава – метод рентгеновской дифракции (РФА, дифрактометр EMPYREAN); определение количественного элементного состава – локальный рентгеноспектральный микроанализ (ЛРСМА, растровый электронный микроскоп JEOL-6510LV с системой энергодисперсионного микроанализа Bruker); исследование размера, структуры и морфологии частиц – метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, Carl Zeiss LIBRA 120), РФА); определение магнитных характеристик образцов – магнитометр VSM с вибрирующим образцом фирмы LakeShore, модель 7404.

В работе [15] было показано, что оптимальная концентрация ионов Fe^{3+} составляет 0.05 М. Концентрации ионов La^{3+} и Zn^{2+} вычисляли по стехиометрическому соотношению:

$$La^{3+}: Zn^{2+}: Fe^{3+} = (1-x): x: 1,$$

где x = 0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 - номинальная степень допирования ($x_{\text{ном}}$).

Объем водного раствора аммиака определяли из расчета количества, необходимого для полного осаждения ионов La^{3+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} и достижения pH 9.

Для расчетов параметров кристаллической решетки использовали программное обеспечение UnitCellWin.

Размер областей когерентного рассеяния (**ОКР**) по данным РФА рассчитывали по формуле Шеррера [16, 17]:

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta},\tag{1}$$

где D_{hkl} – средний размер частиц, Å; k – поправочный коэффициент (для кубической и орторомбической структуры k = 0.9); λ – длина волны рентгеновской трубки (для медной трубки, используемой в данной съемке, $\lambda = 0.15405$ нм); θ – положение максимума пика, град; β_{hkl} – истинное физическое уширение дифракционного максимума, рад.

Величину истинного физического уширения дифракционного максимума рассчитывали по формуле:

$$\beta_{hkl} = \sqrt{\beta_{\mu}^2 - \beta_{\vartheta}^2}, \qquad (2)$$

где β_{μ} — полная ширина (или полуширина) пика на его полувысоте для исследуемого образца; β_{3} полная ширина пика на его полувысоте для эталонного образца.

Для определения функции разрешения дифрактометра использовали монокристаллический кремний.

Определение реального состава синтезированных образцов по результатам ЛРСМА проводили из расчета количества атомов лантана, цинка и кислорода, которое приходится на 1 атом железа.



Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы порошков номинального состава: $1 - LaFeO_3$; $2 - La_{0.95}Zn_{0.05}FeO_3$; $3 - La_{0.925}Zn_{0.075}FeO_3$; $4 - La_{0.92}Zn_{0.1}FeO_3$; $5 - La_{0.85}Zn_{0.15}FeO_3$; $6 - La_{0.8}Zn_{0.2}FeO_3$; $7 - La_{0.7}Zn_{0.3}FeO_3$; $8 - La_{0.6}Zn_{0.4}FeO_3$, полученных золь-гель методом, после отжига при 950°C в течение 60 мин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

К 350 мл кипящей воды при перемешивании механической мешалкой прибавляли 50 мл смеси, содержащей 0.05(1 - x) М LaCl₃, $0.05 \cdot x$ М Zn(NO₃)₂ (где номинальная степень допирования x = 0, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4) и 0.05 М Fe(NO₃)₃. Полученный золь охлаждали до комнатной температуры, при этом он приобретал красно-коричневый цвет, сохранявшийся при охлаждении. Затем при перемешивании механической мешалкой (со скоростью 3000 об./мин) добавляли осадитель в количестве, необходимом для полного осаждения катионов.

Осажденные гидроксиды перемешивали в течение 10—15 мин механической мешалкой. После отделения на вакуум-фильтре осадки промывали несколько раз дистиллированной водой до отсутствия анионов СГ[−] и высушивали при комнатной температуре до постоянной массы. Полученные осадки прокаливали в муфельной печи при 950°С в течение 1 ч. Такой режим отжига был выбран на основании результатов работ, выполненных ранее в нашей лаборатории [16].

Измерения магнитных свойств проводили на магнитометре фирмы LakeShore модель 7407 в полях до 1300 кА/м в азотном криостате. Навеску массой 15–30 мг запаковывали в микропакет из полиэтиленфталата. Размеры образцов не превышали $4 \times 6 \times 0.5$ мм. Внешнее поле прикладыва-

лось в плоскости образца для минимизации влияния размагничивающего фактора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам РФА (рис. 1) синтезированных нанопорошков, образцы $La_{1-x}Zn_xFeO_3$ с $x_{\text{ном}} \leq 0.2$ являются однофазными: все пики на дифрактограмме соответствуют фазе ортоферрита лантана LaFeO₃ (номер карты 15-0148) [18]. При увеличении содержания цинка в системе на дифрактограммах помимо пиков ортоферрита лантана фиксируются максимумы, отвечающие β -Fe₂O₃ (номер карты 39-0238) [18].

На основании анализа результатов РФА (рис. 1) можно сделать вывод, что максимальная номинальная степень допирования феррита лантана цинком составляет $x_{\text{ном}} = 0.2$, так как дальнейшее увеличение содержания допанта приводит к появлению дополнительных фаз.

Результаты расчета параметров элементарной ячейки $La_{1-x}Zn_xFeO_3$ свидетельствуют, что при введении катионов цинка происходит их немонотонное увеличение, максимальное изменение составляет 0.5% от эталонных значений.

В аналогичной системе $Y_{1-x}Zn_xFeO_3$ при $x_{HOM} \ge 0.3$ выделяется фаза феррита цинка $ZnFe_2O_4$ [19], что свидетельствует о встраивании Zn^{2+} в положения Y^{3+} . Кроме того, несмотря на близость

Таблица 2. ОКР нанокристаллов $La_{1-x}Zn_xFeO_3$ с номинальным содержанием цинка *x* от 0 до 0.20 после отжига при 950°С в течение 60 мин

Степень допирования	x = 0	x = 0.05	x = 0.075	x = 0.1	x = 0.15	x = 0.2
ОКР, нм	58 ± 6	149 ± 2	155 ± 3	110 ± 5	136 ± 3	123 ± 2

ионных радиусов цинка и железа ($r(Zn^{2+}) = 0.74$ Å, $r(Fe^{3+}) = 0.67$ Å [9]), для катионов Zn^{2+} нехарактерно размещение в октаэдрических позициях. Сходство свойств иттрия и лантана позволяет сделать вывод о том, что в исследуемых образцах происходит замещение La³⁺ на Zn²⁺, т.е. образуются твердые растворы замещения.

Результаты определения размера ОКР (области когерентного рассеяния) по формуле Шеррера [16, 17] представлены в табл. 2.

На ПЭМ-изображении недопированного образца LaFeO₃ (рис. 2) видны шарообразные частицы с широким распределением по размеру. Средний диаметр кристаллитов составляет 90 \pm 5 нм. Большой разброс значений $D_{\rm cp}$ связан со склонностью частиц к агломерации в процессе зольгель синтеза.

На рис. 3 представлено ПЭМ-изображение порошка номинального состава $La_{0.95}Zn_{0.05}FeO_3$. Размер частиц лежит в пределах 20—90 нм. Средний диаметр кристаллитов составляет 64 \pm 5 нм. Исследование методом ПЭМ показывает, что форма ча-

стиц синтезированного образца La_{0.95}Zn_{0.05}FeO₃ близка к сферической, заметны агломераты частиц, но степень агломерации незначительна.

Для образца номинального состава $La_{0.925}Zn_{0.075}FeO_3$ характерно образование игольчатых кристаллов (рис. 4). Интересно отметить, что ранее образцов с подобной морфологией не наблюдалось [11, 13]. Средний диаметр синтезированных частиц составляет 25 нм.

Для образцов La_{1 – x}Zn_xFeO₃ ($x_{\text{ном}} = 0.1, 0.15, 0.2$) были получены ПЭМ-изображения, аналогичные микрофотографии образца с $x_{\text{ном}} = 0.075$ (рис. 4). Анализ результатов определения размера частиц нанопорошков La_{1 – x}Zn_xFeO₃ позволяет сделать вывод о немонотонном характере увеличения D_{cp} кристаллитов с повышением содержания допанта в составе синтезированных образцов. Завышение значений D_{cp} , рассчитанных по данным РФА, по сравнению с результатами ПЭМ связано с особенностями используемых методов. Определение среднего размера ОКР по ширине дифракционного максимума с использованием формулы



Рис. 2. ПЭМ-изображение порошка LaFeO $_3$ (осадитель – NH₄OH) после отжига при 950°C в течение 60 мин.



Рис. 3. ПЭМ-изображение (а) и гистограмма распределения частиц по размерам (б) порошка номинального состава La_{0.95}Zn_{0.05}FeO₃ после отжига при 950°C в течение 60 мин.

Шеррера приводит к значительным погрешностям, которые могут быть вызваны следующими причинами: выбор математической модели анализа профиля рентгеновских линий для определения распределения частиц по размерам; влияние различных факторов на эффект уширения дифракционных максимумов, в частности наличия дефектов, микродеформаций. Кроме того, дифракционный метод является объемным и потому определяет размер частиц, усредненный по всему объему, в отличие от электронной микроскопии. которая является локальным визуальным методом оценки размера частиц. Результаты ПЭМ в определенной степени зависят от возможности исследования в реальных условиях только относительно небольшого числа частиц и от качества предварительного диспергирования порошков, что вносит высокую долю неопределенности в получаемые результаты. Тем не менее просвечивающая электронная микроскопия является прямым и точным методом определения размера и формы частиц.

Таким образом, на основании анализа полученных данных и в соответствии с результатами работы [20] можно заключить, что только комплексный подход к определению размеров наночастиц, основанный на использовании самого широкого спектра методов и сравнительном анализе полученных результатов, может дать надежную и корректную информацию о размере и форме частиц нанопорошков. В табл. 3 представлены результаты элементного анализа однофазных образцов $La_{1-x}Zn_xFeO_3$, поскольку выделение второй фазы затрудняет определение их реального состава.



Рис. 4. ПЭМ-изображение порошка номинального состава $La_{0.925}Zn_{0.075}FeO_3$ (осадитель – NH_4OH) после отжига при 950°С в течение 60 мин.

Номинальный состав образцов		Реальный состав			
	La	Zn	Fe	0	образцов
LaFeO ₃	18.13 ± 1.88	0.00	20.32 ± 1.07	61.5 ± 2.27	La _{0.90} FeO _{3.06}
$La_{0.95}Zn_{0.05}FeO_3$	16.76 ± 1.77	0.48 ± 0.07	19.72 ± 1.06	63.04 ± 2.35	$La_{0.85}Zn_{0.024}FeO_{3.20}$
$La_{0.925}Zn_{0.075}FeO_{3}$	16.39 ± 1.60	1.41 ± 0.14	20.35 ± 1.01	61.85 ± 2.14	$La_{0.81}Zn_{0.072}FeO_{3.04}$
$La_{0.90}Zn_{0.10}FeO_3$	14.60 ± 1.37	1.11 ± 0.07	17.35 ± 0.64	66.95 ± 3.21	$La_{0.84}Zn_{0.063}FeO_{3.80}$
$La_{0.85}Zn_{0.15}FeO_3$	15.31 ± 1.42	0.66 ± 0.05	15.82 ± 0.58	68.22 ± 3.23	$La_{0.97}Zn_{0.042}FeO_{4.31}$
$La_{0.80}Zn_{0.20}FeO_3$	15.29 ± 1.39	1.01 ± 0.68	17.51 ± 0.62	66.18 ± 3.08	$La_{0.87}Zn_{0.058}FeO_{3.78}$

Таблица 3. Результаты ЛРСМА образцов $La_{1-x}Zn_xFeO_3$, синтезированных золь-гель методом, после отжига при 950°С в течение 60 мин

Таблица 4. Магнитные характеристики однофазных образцов $La_{1-x}Zn_xFeO_3$ (осадитель – водный раствор аммиака, отжиг при 950°С, 60 мин), измеренные при 300 и 100 К

Реальный состав	ОКР, нм	<i>J</i> (300 K), А м²/кг	$\chi \times 10^{-6}$ (300 K)	<i>J</i> (100 K), А м ² /кг	$\chi \times 10^{-6}$ (100 K)
La _{0.90} FeO _{3.06}	58 ± 6	0.188	11.5	0.167	9.4
$La_{0.85}Zn_{0.024}FeO_{3.20}$	149 ± 2	0.252	15.4	0.340	16.9
$La_{0.97}Zn_{0.042}FeO_{4.31}$	136 ± 3	0.008	14.6	0.044	36.8
$La_{0.87}Zn_{0.058}FeO_{3.78}$	123 ± 2	0.316	19.9	0.416	30.6
$La_{0.84}Zn_{0.063}FeO_{3.80}$	110 ± 5	0.086	20.9	0.259	30.5
$La_{0.81}Zn_{0.072}FeO_{3.04}$	155 ± 3	0.245	15.3	0.747	46.1

Из табл. 3 следует, что в образцах La_{1-x}Zn_xFeO₃ ($x_{\text{ном}} = 0, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2$) количество цинка меньше теоретически возможного. Кроме того, после номинальной степени допирования $x_{\text{ном}} = 0.075$, которой соответствует реальный со-



Рис. 5. Полевая зависимость намагниченности образцов La_{1 – x}Zn_xFeO₃ (отжиг при 950°С, 60 мин), измеренная при 300 K: $1 - LaFeO_3$; $2 - La_{0.925}Zn_{0.075}FeO_3$; $3 - La_{0.6}Zn_{0.4}FeO_3$.

став La_{0.81}Zn_{0.072}FeO_{3.04}, содержание атомов цинка немонотонно уменьшается. Это может быть вызвано растворением гидроксида цинка вследствие его амфотерности. Таким образом, максимальная реальная степень допирования феррита лантана цинком составляет x = 0.072.

Исследование магнитных характеристик синтезированных образцов проводилось при температурах 300 и 100 К (табл. 4). Анализ полученных результатов показал, что при увеличении содержания цинка в составе $La_{1-x}Zn_xFeO_3$ удельная намагниченность (*J*) и магнитная восприимчивость (χ) проб в поле 1300 кА/м немонотонно возрастают.

На рис. 5 и 6 показаны зависимости намагниченности синтезированных нанопорошков от напряженности приложенного поля при 300 и 100 К. По характеру петли гистерезиса нанопорошки составов La_{0.90}FeO_{3.06}, La_{0.85}Zn_{0.024}FeO_{3.20}, La_{0.97}Zn_{0.042}FeO_{4.31}, La_{0.87}Zn_{0.058}FeO_{3.78}, La_{0.84}Zn_{0.063}FeO_{3.80} и La_{0.81}Zn_{0.072}FeO_{3.04} являются парамагнетиками. Образцы с $x_{\text{ном}} = 0.3$ и 0.4 проявляют ферромагнитный характер, обусловленный присутствием примеси фазы β-Fe₂O₃, обладающей ярко выраженным ферромагнетизмом [21]. Понижение температу-



Рис. 6. Полевая зависимость намагниченности образцов La_{1 – x}Zn_xFeO₃ (отжиг при 950°С, 60 мин), измеренная при 100 K: $1 - LaFeO_3$; $2 - La_{0.925}Zn_{0.075}FeO_3$; $3 - La_{0.6}Zn_{0.4}FeO_3$.

ры измерения до 100 К приводит к снижению значений магнитных характеристик для LaFeO₃ и увеличению намагниченности и магнитной восприимчивости для образцов, содержащих цинк.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о повышении удельной намагниченности и магнитной восприимчивости нанопорошков La_{1-x}Zn_xFeO₃ при увеличении содержания допанта.

Изменения магнитных свойств феррита лантана при допировании двухзарядными катионами вызваны несколькими причинами: во-первых, из-за разности ионных радиусов La³⁺ и допанта возникает искажение кристаллической решетки и меняется размер частиц; во-вторых, подобное легирование относится к разновалентным изоморфным превращениям, в результате которых образуются катионы Fe⁴⁺, т.е. возникает двойное обменное взаимодействие Fe³⁺–O^{2–}–Fe⁴⁺ [22]. Кроме того, значительное влияние на поведение образцов в магнитном поле оказывают размер и форма кристаллитов. Все эти факторы вносят свой вклад в формирование магнитных свойств синтезированных образцов La_{1 – x}Zn_xFeO₃.

Описанные результаты могут быть использованы для получения объемных композитных материалов [23, 24]. Кроме того, обнаруженные включения ферромагнитной фазы β -Fe₂O₃ показывают перспективность синтезированных образцов для создания гранулированных структур [25–27].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания вузам в сфере научной деятельности на 2014–2016 годы (проект № 225).

Исследования проводили на приборах ЦКПНО ВГУ и кафедры магнетизма МГУ им. М.В. Ломоносова, в последнем случае – с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Berry F.J., Ren X., Gancedo J.R., Marco J.F. // Hyperfine Interact. 2004. V. 156. I. 1. P. 335.
- 2. Zhang Q., Saito F. // J. Mater. Sci. 2001. V. 36. P. 2287.
- 3. *Bayraktar D., Clemens F., Diethelm S. et al.* // J. Eur. Ceram. Soc. 2007. V. 27. № 6. P. 2455.
- Базуев Г.В., Зайцева Н.А., Красильников В.Н., Келлерман Д.Г. // Журн. неорган. химии. 2003. Т. 48. № 2. С. 219 [Bazuev G.V., Zaitseva N.A., Krasil'nikov V.N., Kellerman D.G. // Russ. J. Inorg. Chem. 2003. V. 48. № 2. P. 170].
- 5. *Гусева А.Ф., Нейман А.Я., Нохрин С.С.* Методы получения наноразмерных материалов. Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2008. 90 с.
- 6. *Курочкин В.Ю., Ильин А.А., Ильин А.П.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. № 5. С. 90.
- 7. *Нгуен Ань Тьен, Миттова В.О., Миттова И.Я., Динь Ван Так //* Конденс. среды и межфазные границы. Воронеж. 2010. Т. 12. № 1. С. 56.
- Nguyen Anh Tien, Knurova M.V., Nguyen Thi Mo et al. // Nanosystems: phys., chem., math. 2014. V. 5(5). P. 672.
- 9. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1991. 432 с.
- Mukhopadhyay K., Mahapatra A.S., Chakrabarti P.K. // J. Magn. Magn. Mater. 2013. V. 329. P. 133.
- Shuhua Dong, Kejing Xu, Guishan Tian // J. Mater. Sci. 2009. V. 44. P. 2548.
- 12. Mukhopadhyay K., Mahapatra A.S., Chakrabarti P.K. // Mater. Lett. 2015. V. 159. P. 9.
- Irshad Bhat, Shahid Husain, Wasi Khan, Patil S.I. // Mater. Res. Bull. 2013. V. 48. P. 4506.
- Карпова С.С., Мошников В.А., Мякин С.В., Коловангина Е.С. // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 3. С. 369.
- Нгуен Ань Тьен, Миттова И.Я., Альмяшева О.В. и др. // Физика и химия стекла. 2008. Т. 34. № 6. С. 992.
- 16. *Гусев А.И*. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
- 17. *Брандон Д., Каплан У.* Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
- 18. JCPDC PCPDFWIN: A Windows Retrieval/Display program for Accessing the ICDD PDF 2 Data base, International Centre for Diffraction Data. 1997.
- Кнурова М.В., Нгуен Ань Тьен, Миттова В.О., Миттова И.Я. // Тез. докл. 3 Междунар. конф. стран СНГ "Золь-гель синтез и исследование неорганических соединений, гибридных функциональных

материалов и дисперсных систем". 8–12 сентября 2014 г., Суздаль. Иваново: ОАО Изд-во "Иваново", 2014. С. 137.

- 20. Альмяшева О.В., Федоров Б.А., Смирнов А.В., Гусаров В.В. // Наносистемы: физика, химия, математика. 2010. Т. 1. № 1. С. 26.
- 21. Zboril R., Mashlan M., Petridis D. // Chem. Mater. 2002. V. 14. P. 969.
- Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, Гл. ред. физ.мат. лит., 1987. 160 с.
- Новоторцев В.М., Маренкин С.Ф., Королева Л.И. и др. // Журн. неорган. химии. 2009. Т. 54. № 9. С. 1350

[Novotortsev V.M., Marenkin S.F., Koroleva L.I. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2009. V. 54. № 9. P. 1350].

- Маренкин С.Ф., Трухан В.М., Федорченко И.В. и др. // Журн. неорган. химии. 2014. Т. 59. № 4. С. 511 [Marenkin S.F., Trukhan V.M., Fedorchenko I.V. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2014. V. 59. № 4. Р. 355].
- Маренкин С.Ф., Изотов А.Д., Федорченко И.В., Новоторцев В.М. // Журн. неорган. химии. 2015. Т. 60. № 3. С. 343 [Marenkin S.F., Izotov A.D., Fedorchenko I.V., Novotortsev V.M. // Russ. J. Inorg. Chem. 2015. V. 60. № 3. Р. 295].
- 26. Tang D.P., Yuan R., Chai Y.Q. // Biotechnol. Lett. 2006. V. 28. P. 559.
- 27. Gupta A.K., Gupta M. // Biomater. 2005. V. 26. P. 3995.