

## МИКРОВОЛНОВЫЙ СИНТЕЗ ОРТОФЕРРИТА ИТТРИЯ И ДОПИРОВАНИЕ ЕГО НИКЕЛЕМ

© 2019 Е. В. Томина✉, Н. А. Куркин, С. А. Мальцев

*Воронежский государственный университет  
Университетская пл., 1, 394018 Воронеж, Российская Федерация*

**Аннотация.** Установлено активирующее действие микроволнового излучения в процессе синтеза нанопорошков ортоферрита иттрия, допированного никелем, заключающееся в значительном увеличении скорости процесса, снижении температуры отжига, высокой химической гомогенности синтезированных образцов. Реальная степень допирования согласно результатам локального рентгеноспектрального микроанализа оказалась несколько ниже номинальной, максимальная реальная степень допирования составляет 0.12. Средний размер частиц  $YFeO_3$  и  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$  находится в диапазоне 200–300 нм.

**Ключевые слова:** микроволновый синтез, ортоферрит иттрия, допирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений материаловедения является создание эффективных магнитоэлектрических ферритов. Ортоферрит иттрия – материал, который обладает спектром практически значимых свойств, а именно значительной коэрцитивной силой, высокой подвижностью доменных границ, каталитической активностью с возможностью ее магнитного восстановления и др. [1]. Все больший интерес вызывает синтез и исследование свойств допированных ферритов, которые находят широкое применение при изготовлении устройств хранения информации. Так, варьируя состав материалов, можно изменять их магнитные характеристики, что значительно расширяет сферы их применения. Синтез оксидов редкоземельных металлов в кристаллической форме с использованием классической керамической технологии [2] требует дорогостоящего оборудования, позволяющего достичь высоких температур вплоть до 1500 °С и выше. Основным недостатком такого синтеза ферритов является высокая энергоемкость и длительность процесса [3]. Поэтому актуальной остается разработка простого и масштабируемого синтеза наночастиц магнитных материалов [4], позволяющего обеспечить химическую гомогенность, снизить энергозатраты и значительно увеличить ско-

рость получения конечного многокомпонентного продукта.

Цель работы – синтез нанопорошков недопированного и допированного никелем  $YFeO_3$  под воздействием микроволнового излучения.

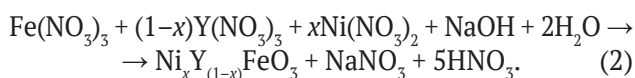
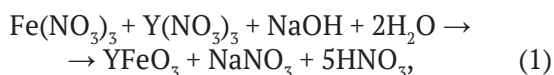
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез ортоферрита иттрия и допирование его ионами  $Ni^{2+}$  осуществляли под воздействием микроволнового излучения на раствор прекурсоров. Для синтеза  $YFeO_3$  в качестве прекурсоров были выбраны кристаллогидраты нитратов железа и иттрия, так как они интенсивно поглощают микроволновое излучение. Данный эффект связан с тем, что молекулы воды обладают значительным дипольным моментом, а вследствие своей электронейтральности жестко не закреплены в кристаллической структуре и способны к переориентации и вращению при микроволновом воздействии. Разложение кристаллогидратов в микроволновом поле до оксидного продукта происходит в том случае, если образование оксида начинается до удаления всей содержащейся в системе воды, чему в полной мере соответствуют нитраты 3d-металлов ( $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ,  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ).

К растворенному в 50 ml воды нитрату железа (III)  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  (ХЧ ТУ 6-09-02-553-96) в эквивалентном количестве добавляли нитрат иттрия  $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  (ЧДА CAS 13494-98-9) и 20 % NaOH (ЧДА ГОСТ 432877), а при легирова-

✉ Томина Елена Викторовна,  
e-mail: [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru)

нии ионами  $\text{Ni}^{2+}$  –  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  (ЧДА ГОСТ 4055-48). Объем водного раствора гидроксида натрия определяли из расчета количества, необходимого для полного осаждения ионов  $\text{Y}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и достижения  $\text{pH} = 7$  (отдельные образцы синтезировали при  $\text{pH} = 9$ ). Для активации процесса синтеза ортоферрита иттрия раствор прекурсоров подвергали воздействию микроволнового излучения (MMW-2013,  $P_{\text{max}} = 800 \text{ W}$ , рабочая частота – 2450 MHz) 10 минут при заданной мощности 700 W. Реакции синтеза протекают по уравнениям:



Образующиеся осадки помещали в ультразвуковую ванну (ВУ-09-«Я-ФП»-02) на 10 минут для повышения степени дисперсности. После охлаждения до комнатной температуры промывали дистиллированной водой, отфильтровывали и высушивали на воздухе. Затем порошки отжигали в муфельной печи (SNOL 8,2/1100) 1 час при температурах 750, 650 и 600 °С.

При синтезе ортоферрита иттрия, допированного никелем, концентрации ионов никеля и железа вычисляли по стехиометрическому соотношению:  $\text{Y}^{3+} : \text{Ni}^{2+} : \text{Fe}^{3+} = (1-x) : x : 1$ , где  $x = 0.05, 0.10, 0.15$  – номинальная степень допирования.

Для исследования фазового состава образцов использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 с анодом Мо ( $\lambda = 0.71075 \text{ nm}$ ). Размер областей когерентного рассеивания (ОКР) по данным рентгенофазового анализа (РФА) рассчитывали по формуле Шеррера [5]:

$$D_{hkl} = \frac{kx\lambda}{\beta_{hkl} \cdot \cos\theta}, \quad (3)$$

где  $D_{hkl}$  – средний размер частиц, Å,  $k$  – поправочный коэффициент (для кубической и орторомбической структуры  $k = 0.9$ ),  $\lambda$  – длина волны рентгеновской трубки,  $\theta$  – положение максимума пика, град.,  $\beta_{hkl}$  – истинное физическое уширение дифракционного максимума, рад.

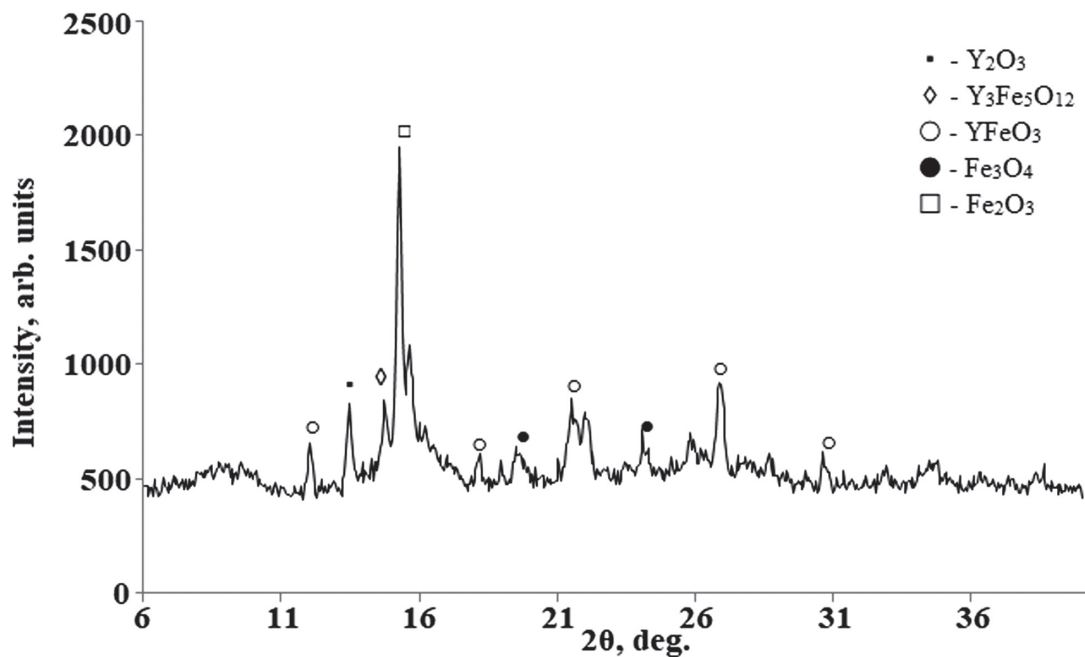
Элементный состав синтезированных порошков определяли методом локального рентгеноспектрального микроанализа (ЛРСМА, рэстровый электронный микроскоп JEOL-6510LV с системой энергодисперсионного микроанализа *Bruker*).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

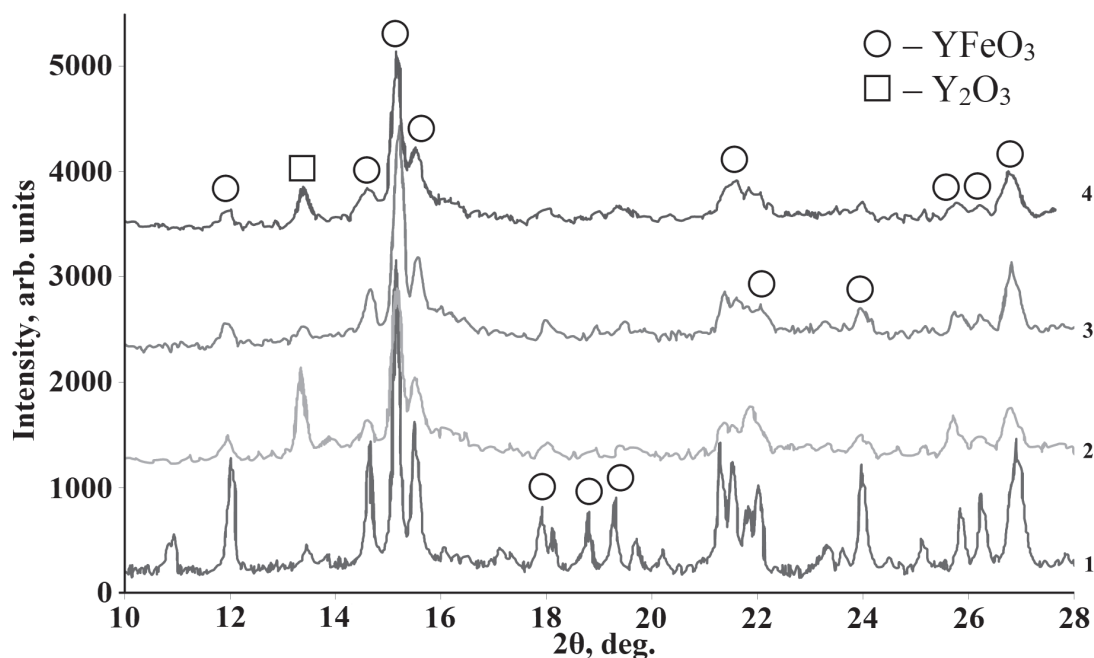
Согласно [6] разложение кристаллогидратов 3d-элементов в микроволновом поле осуществляется до оксидной фазы в несколько ступеней. Изначально растворы кристаллогидратов поглощают микроволновое излучение за счет кристаллизационной воды. При температурах 130–180 °С начинается гидролиз солей с формированием в качестве промежуточных продуктов оксо- и гидроксо соединений. Образующиеся после разложения солевых композиций высокодисперсные частицы оксидов, равномерно распределенные по реакционному объему, способны активно взаимодействовать друг с другом. Значительный вклад вносит и специфическое «нетермическое» воздействие микроволнового излучения, связанное с генерацией ионных токов на межкристаллитных границах, интенсивность которых существенно возрастает в высокодисперсных системах. Таким образом, микроволновое излучение стимулирует разложение солевых прекурсоров, дегидратацию и синтез  $\text{YFeO}_3$  за счет однородности и высокой скорости микроволнового нагрева и ускорения процессов «зародышеобразования» под влиянием «нетермических» эффектов [7, 8].

Синтез феррита иттрия под действием микроволнового излучения при  $\text{pH} = 9$  приводит к формированию многофазных образцов, о чем свидетельствуют данные РФА (рис. 1). Поэтому в качестве оптимального значения  $\text{pH}$  раствора прекурсоров было выбрано  $\text{pH} = 7$ , что позволяло формировать практически однофазные образцы  $\text{YFeO}_3$  [9] с незначительным содержанием оксида иттрия (рис. 2). По данным РФА методом «корундовых чисел» [10] установлено, что содержание примеси в недопированном  $\text{YFeO}_3$  не превышает 3 %, а в образцах  $\text{Ni}_x\text{Y}_{1-x}\text{FeO}_3$  – 4 %. Снижение температуры отжига с 750 °С до 650–600 °С приводило к уширению рефлексов феррита иттрия на дифрактограммах, что, видимо, связано с уменьшением степени кристалличности образцов. Поэтому в дальнейшем отжиг осуществляли при 750 °С. Отсутствие на дифрактограммах никельсодержащих фаз свидетельствует о встраивании ионов  $\text{Ni}^{2+}$  в кристаллическую решетку феррита иттрия.

В силу близости атомных характеристик и кристаллохимических параметров никель должен встраиваться в решетку феррита иттрия в положение железа. Этому, по всей видимости, должны способствовать и более близкие радиусы ионов  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  (по данным [11] – 0.083 nm для  $\text{Ni}^{2+}$  и 0.079 nm для  $\text{Fe}^{3+}$ ) по сравнению с ра-



**Рис. 1.** Дифрактограмма образца  $YFeO_3$ , синтезированного под воздействием микроволнового излучения при  $pH = 9$   
 [Fig. 1. Diffraction pattern of the  $YFeO_3$  sample synthesized under microwave radiation at  $pH = 9$ ]



**Рис. 2.** Дифрактограммы образцов, синтезированных под воздействием микроволнового излучения при  $pH = 7$ : 1 -  $YFeO_3$ , 2 -  $Ni_{0.05}Y_{0.95}FeO_3$ , 3 -  $Ni_{0.10}Y_{0.90}FeO_3$ , 4 -  $Ni_{0.15}Y_{0.85}FeO_3$   
 [Fig. 2. Diffraction patterns of samples synthesized by the microwave radiation at  $pH = 7$ : 1 -  $YFeO_3$ , 2 -  $Ni_{0.05}Y_{0.95}FeO_3$ , 3 -  $Ni_{0.10}Y_{0.90}FeO_3$ , 4 -  $Ni_{0.15}Y_{0.85}FeO_3$ ]

диусом иона  $Y^{3+}$  (0.090 nm). Однако сдвиг самого интенсивного рефлекса  $YFeO_3$  на дифрактограммах в сторону меньшего значения угла  $2\theta$  при увеличении степени допирования никелем (рис. 3) указывает на встраивание ионов никеля на место иттрия, на что обращали внимание и авторы [12]. Таким образом, однозначно говорить о встраивании допанта в положение железа либо иттрия на данном этапе достаточно затруднительно.

Расчет параметров и объема элементарной ячейки синтезированных образцов ферритов в программе «UnitCell» (табл. 1) выявил тенденцию уменьшения как параметров (хотя и несколько немонотонную), так и объема ячейки с ростом степени допирования  $YFeO_3$  никелем. Данный факт свидетельствует о встраивании иона  $Ni^{2+}$  (ионный радиус 0.083 nm) в положение иона с большим радиусом, а именно  $Y^{3+}$  (0.090 nm).

Расчет ОКР для синтезированных образцов ферритов по формуле Шеррера показал, что средний размер частиц  $YFeO_3$  и  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$  находится в диапазоне 200–300 nm (табл. 2), причем для допированного феррита диаметр частиц в среднем на 100 nm меньше недопированного  $YFeO_3$ .

В табл. 3 представлены результаты элементного анализа однофазных образцов  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$ , так как выделение второй фазы затрудняет определение их реального состава. Согласно данным ЛРСМА образцы  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$  содержат в своем составе никель, однако его содержание меньше номинальной степени допирования. Тем не менее, с увеличением степени допирования феррита иттрия, содержание никеля в синтезированных образцах также возрастает. Максимальная реальная степень допирования феррита иттрия никелем составляет  $x = 0.12$ .

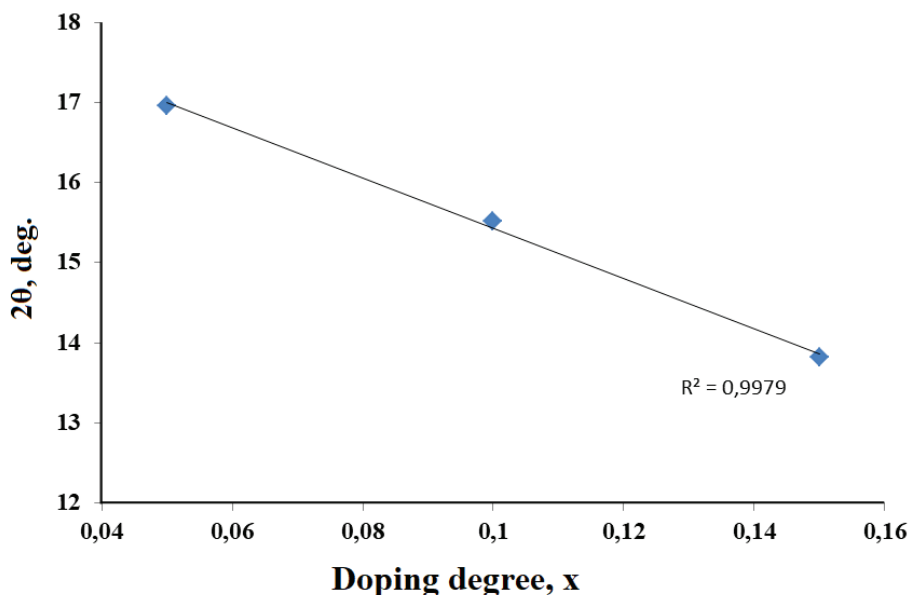


Рис. 3. Зависимость значения угла  $2\theta$  самого интенсивного рефлекса  $YFeO_3$  от степени допирования никелем

[Fig. 3. Dependence of the angle  $2\theta$  of the most intense  $YFeO_3$  reflex on nickel doping]

Таблица 1. Параметры и объем элементарной ячейки синтезированных образцов  $YFeO_3$  и  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$

[Table 1. Parameters and volume of the unit cell of synthesized  $YFeO_3$  and  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$  samples]

Параметры ячейки, Å [Cell parameters, Å]	Эталон $YFeO_3$ [Standard $YFeO_3$ ]	Образец № 1 $YFeO_3$ [Sample No. 1 $YFeO_3$ ]	Образец № 2 $Ni_{0.05}Y_{0.95}FeO_3$ [Sample No. 2 $Ni_{0.05}Y_{0.95}FeO_3$ ]	Образец № 3 $Ni_{0.10}Y_{0.90}FeO_3$ [Sample No. 3 $Ni_{0.10}Y_{0.90}FeO_3$ ]	Образец № 4 $Ni_{0.15}Y_{0.85}FeO_3$ [Sample No. 4 $Ni_{0.15}Y_{0.85}FeO_3$ ]
<i>a</i>	5.2819	5.28359	5.21246	5.24684	5.19749
<i>b</i>	5.5957	5.59712	5.62689	5.58342	5.58931
<i>c</i>	7.6046	7.60705	7.58622	7.55702	7.61134
Объем, (Å) <sup>3</sup>	224.8	224.9621	222.5033	221.3850	221.1126

**Таблица 2.** Размер ОКР (данные РФА) частиц  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$  с номинальным содержанием никеля  $x$  от 0 до 0.15

[Table 2. Average particle diameter of all samples  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$  with a nominal nickel content of  $x$  from 0 to 0.15]

ОКР, nm	Образец № 1 $YFeO_3$ [Sample No. 1 $YFeO_3$ ]	Образец № 2 $Ni_{0.05}Y_{0.95}FeO_3$ [Sample No. 2 $Ni_{0.05}Y_{0.95}FeO_3$ ]	Образец № 3 $Ni_{0.10}Y_{0.90}FeO_3$ [Sample No. 3 $Ni_{0.10}Y_{0.90}FeO_3$ ]	Образец № 4 $Ni_{0.15}Y_{0.85}FeO_3$ [Sample No. 4 $Ni_{0.15}Y_{0.85}FeO_3$ ]
$D_1$	386±13	167±4	175±3	104±2
$D_2$	311±8	227±6	174±7	305±6
$D_3$	237±6	185±5	223±8	239±4
$D_{aver}$	311±9	193±5	191±6	216±3

**Таблица 3.** Результаты элементного анализа (ЛРСМА) образцов  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$

[Table 3. The results of elemental analysis of samples  $Ni_xY_{1-x}FeO_3$ ]

Номинальный состав образцов (Н) [Nominal composition sample (N)]	Элементный состав, ат. % [Elemental composition, at. %]				Реальный состав образцов (Р) [Real composition sample (R)]
	Y	Ni	Fe	O	
$Ni_{0.05}Y_{0.95}FeO_3$	10.57±1.41	0.54±0.08	16.11±1.56	71.64±1.81	$Ni_{0.034}Y_{0.65}FeO_{4.45}$
$Ni_{0.1}Y_{0.9}FeO_3$	14.86±1.54	1.00±0.11	17.18±1.62	66.95±1.70	$Ni_{0.058}Y_{0.86}FeO_{3.89}$
$Ni_{0.15}Y_{0.85}FeO_3$	9.76±1.32	2.08±0.18	17.25±1.64	70.91±1.78	$Ni_{0.121}Y_{0.57}FeO_{4.11}$

Таким образом, активация синтеза феррита иттрия микроволновым излучением значительно увеличивает скорость процесса, снижает температуру отжига и обеспечивает высокую химическую гомогенность образцов (РФА).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика активированного микроволновым и ультразвуковым излучением синтеза нанопорошков  $YFeO_3$  и  $Ni_xY_{(1-x)}FeO_3$ . Результаты РФА подтвердили высокую химическую гомогенность синтезированных образцов. Наличие никеля в допированных образцах  $Ni_xY_{(1-x)}FeO_3$  (данные ЛРСМА) при отсутствии рефлексов никельсодержащих фаз на дифрактограммах (данные РФА) свидетельствует о встраивании ионов  $Ni^{2+}$  в кристаллическую решетку феррита иттрия. Сдвиг самого интенсивного рефлекса  $YFeO_3$  на дифрактограммах нанопорошков  $Ni_xY_{(1-x)}FeO_3$  в сторону меньшего значения угла  $2\theta$ , уменьшение объема элементарной ячейки допированных образцов ферритов при увеличении степени допирования никелем являются аргументами в пользу встраивания  $Ni^{2+}$  в кристаллической решетке  $YFeO_3$  в положение  $Y^{3+}$ .

### БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты исследований получены на оборудовании Центра коллективного пользова-

ния научным оборудованием Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попков В. И., Альмяшева О. В. Формирование нанопорошков ортоферрита иттрия  $YFeO_3$  в условиях глицин-нитратного горения // *Журнал Прикладной Химии*, 2014, т. 87(2), с. 185–189.
2. Летюк Л. М., Костишин В. Г., Гончар А. В. *Технология ферритовых материалов магнетроники*. М.: МИСиС, 2005, 352 с.
3. Petrova E., Kotsikau D., Pankov V. Structural characterization and magnetic properties of sol-gel derived  $Zn_xFe_{3-x}O_4$  nanoparticles // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, v. 378. Pp. 429–435. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.11.076
4. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лаврушина С. С. *Наноматериалы: синтез нанокристаллических порошков и получение компактных нанокристаллических материалов: учебное пособие для вузов*. Воронеж: ЛОП ВГУ, 2007, 35 с.
5. Брандон Д., Каплан У. *Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля*. М.: Техносфера, 2004, 384 с.

6. Третьяков Ю. Д. Развитие неорганической химии как фундаментальной основы создания новых поколений функциональных материалов // *Успехи химии*, 2004, т. 74(9), с. 899–916.

7. Томина Е. В., Миттова И. Я., Бурцева Н. А. Патент РФ, № 2548089, 2015.

8. Кузнецова В. А., Альмяшева О. В., Гусаров В. В. Влияние микроволновой и ультразвуковой обработки на образование  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в гидротермальных условиях // *Физика и химия стекла.*, 2009, т. 35(2), с. 266–272.

9. *International Center for Diffraction Data.*

10. Шпанченко Р. В., Розова М. Г. *Методическая разработка для спецпрактикума к курсу лекций*

«Практические аспекты рентгеновской дифрактометрии». М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998, 25 с.

11. Третьяков Ю. Д. *Неорганическая химия. Химия элементов: учебник для студ. вузов, обуч. по направлению 510500 “Химия” и специальности 011000 “Химия”: в 2 т.* М.: Изд-во Моск. ун-та : Академкнига, 2007, т. 1, 538 с.; т. 2, 670 с.

12. Томина Е. В., Даринский Б. М., Миттова И. Я., Чуркин В. Д., Бойков Н. И., Иванова О. В. Синтез нанокристаллов  $\text{YCo}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$  под воздействием микроволнового излучения // *Неорганические материалы*, 2019, т. 55(4), с. 421–425. DOI: 10.1134/S0002337X19040158

UDC 542.943:546.682'18

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/768>

Received 01.04.2019

Accepted 15.05.2019

## MICROWAVE SYNTHESIS OF YTTRIUM ORTHOFERRITE DOPED WITH NICKEL

© 2019 E. V. Tomina✉, N. A. Kurkin, S. A. Mal'tsev

*Voronezh State University*

*1, Universitetskaya pl., 394018 Voronezh, Russian Federation*

### Abstract

**Purpose.** Nanocrystals, thin films, heterostructures based on nanoscale doped yttrium ferrite are promising AS functional magnetic materials. Solid-phase synthesis of ferrite-based materials requires prolonged heating to temperatures of up to 1500 °C, which significantly increases energy costs. It is a pressing challenge to synthesize multifunctional nanomaterials based on yttrium ferrite using simple and low-cost methods. The purpose of this work was to synthesize nanopowders of undoped and nickel-doped  $\text{YFeO}_3$  under the influence of microwave radiation.

**Methods and methodology.** Microwave radiation stimulates decomposition of salt precursors, dehydration and synthesis of yttrium ferrite due to homogeneity and high speed of microwave heating and acceleration of the processes of the “nucleation” under the influence of “nonthermal” effects. It was established by the XRD method that the synthesis carried out at pH = 7, the impurity content in undoped  $\text{YFeO}_3$  does not exceed 3 %, and 4 % in  $\text{Ni}_x\text{Y}_{1-x}\text{FeO}_3$  samples.

**Results.** The presence of nickel in the doped samples of  $\text{Ni}_x\text{Y}_{(1-x)}\text{FeO}_3$  (EPXMA data) in the absence of nickel-containing phases on diffraction patterns indicates the incorporation of  $\text{Ni}^{2+}$  ions into the crystal lattice of yttrium ferrite, presumably in the  $\text{Y}^{3+}$  position. This is confirmed by the shift of the most intense  $\text{YFeO}_3$  reflection on the diffractograms of  $\text{Ni}_x\text{Y}_{(1-x)}\text{FeO}_3$  nanopowders to a smaller angle  $2\theta$  and a decrease in the unit cell volume of doped yttrium ferrite samples with an increase in nickel doping from 0.05 to 0.15. The size of the coherent scattering regions of the synthesized  $\text{YFeO}_3$  and  $\text{Ni}_x\text{Y}_{1-x}\text{FeO}_3$  samples is in the range of 200–300 nm.

**Conclusions.** Activation of the synthesis of yttrium ferrite by microwave radiation significantly increases the speed of the process, lowers the annealing temperature, and ensures high chemical homogeneity of the samples.

**Keywords:** microwave synthesis, yttrium orthoferrite, doping.

✉ Tomina Elena V., e-mail: [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru)

## ACKNOWLEDGEMENT

The results of the research were obtained using the equipment of Shared Scientific Equipment Centre of Voronezh State University. URL: <http://ckp.vsu.ru>

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## REFERENCES

1. Popkov V. I., Almjasheva O. V. Yttrium orthoferrite  $YFeO_3$  nanopowders formation under glycine-nitrate combustion conditions. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, v. 87(2), pp. 167-171. DOI: 10.1134/S1070427214020074
2. Letyuk L. M., Kostishin V. G., Gonchar A. V. *Tekhnologiya ferritovykh materialov magnitoelektroniki* [Technology of ferrite materials of magnetoelectronics]. Moscow, MISiS Publ., 2005, 352 p. (in Russ.)
3. Petrova E., Kotsikau D., Pankov V. Structural characterization and magnetic properties of sol-gel derived  $Zn_xFe_{3-x}O_4$  nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, v. 378, pp. 429-435. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.11.076
4. Mittova I. Ya., Tomina E. V., Lavrushina S. S. *Nanomaterialy: sintez nanokristallicheskih poroshkov i poluchenie kompaktnykh nanokristallicheskih materialov : uchebnoe posobie dlya vuzov* [Nanomaterials: the synthesis of nanocrystalline powders and the production of compact nanocrystalline materials: a textbook for universities]. Voronezh, LOP VGU Publ., 2007, 35 p. (in Russ.)
5. Brandon D., Kaplan W. *Microstructural Characterization of Materials*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1999, 424 p.
6. Tretyakov Yu. D. Development of inorganic chemistry as a fundamental for the design of new generations of functional materials. *Russian Chemical Reviews*, 2004, v. 73(9), pp. 831-846. DOI: 10.1070/RC2004v073n09ABEH000914
7. Tomina E. V., Mittova I. Ya., Burtseva N. A., Patent RF, N 2548089, 2015.
8. Kuznetsova V. A., Almjasheva O. V., Gusarov V. V. Influence of microwave and ultrasonic treatment on the formation of  $CoFe_2O_4$  under hydrothermal conditions. *Glass Physics and Chemistry*, 2009, v. 35(2), pp. 205-209.
9. *International Center for Diffraction Data*.
10. Shpanchenko R. V., Rozova M. G. *Metodicheskaya razrabotka dlya spetspraktikuma k kursu leksii «Prakticheskie aspekty rentgenovskoi diffraktometrii»* [Methodical development for the special practical course for lectures "Practical aspects of X-ray diffraction"]]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta Publ., 1998, 25 p. (in Russ.)
11. Tret'yakov Yu. D. *Neorganicheskaya khimiya. Khimiya elementov: uchebnik dlya stud. vuzov, obuch. po napravleniyu 510500 "Khimiya" i spetsial'nosti 011000 "Khimiya" : v 2 t* [Inorganic chemistry. Chemistry of elements: a textbook for students. universities enrolled in the direction 510500 "Chemistry" and specialization 011000 "Chemistry": in 2 volumes]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta: Akademkniga Publ., 2007, v. 1, 538 p.; v. 2, 670 p. (in Russ.)
12. Tomina E. V., Darinskii B. M., Mittova I. Ya., Churkin V. D., Boikov N. I., Ivanova O. V. Sintez nanokristallov  $YCo_xFe_{1-x}O_3$  pod vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya [Synthesis of  $YCo_xFe_{1-x}O_3$  Nanocrystals under the Microwave Radiation], *Inorganic Materials*, v. 55(4), 2019, pp. 421-425. DOI: 10.1134/S0002337X19040158 (in Russ.)

---

Томина Елена Викторовна – д. х. н., доцент, доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru). ORCID – 0000-0002-5222-0756.

Куркин Николай Андреевич – студент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [kurkin.nik@yandex.ru](mailto:kurkin.nik@yandex.ru). ORCID – 0000-0002-0468-8207.

Мальцев Сергей Анатольевич – студент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [sergmal-tsev97@mail.ru](mailto:sergmal-tsev97@mail.ru). ORCID – 0000-0002-7051-7940.

---

Tomina Elena V. – Dr. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science and Industry of Nanosystems, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru). ORCID – 0000-0002-5222-0756.

Kurkin Nikolay A. – Student of the Department of Materials Science and Industry of Nanosystems, Voronezh State University, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: [kurkin.nik@yandex.ru](mailto:kurkin.nik@yandex.ru). ORCID – 0000-0002-0468-8207.

Mal'tsev Sergei A. – Student of the Department of Materials Science and Industry of Nanosystems, Voronezh State University, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: [sergmal-tsev97@mail.ru](mailto:sergmal-tsev97@mail.ru). ORCID – 0000-0002-7051-7940.