

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 542.943:546.05

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3309>

## Синтез нанопорошка феррита висмута, допированного ионами эрбия

Е. В. Томина<sup>1,2</sup> ✉, А. А. Павленко<sup>2</sup>, Н. А. Куркин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,  
ул. Тимирязева, 8, Воронеж 394087, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет,  
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

### Аннотация

Потенциал практического применения феррита висмута (BFO) в устройствах хранения информации, микроэлектроники и спинтроники, в медицинских датчиках различного назначения ограничивает наличие спиновой циклоиды. Ее разрушение, в том числе, за счет допирования редкоземельными элементами и перевода BFO в наноразмерное состояние, способствует возникновению ферромагнетизма и проявлению магнитоэлектрического эффекта. Цель работы заключалась в синтезе нанопорошка феррита висмута, допированного ионами эрбия.

Методом спрей-пиролиза при температуре 760 °С синтезированы образцы BFO с номинальной степенью допирования ионами эрбия от 0.05 до 0.20. Данные рентгенофазового анализа показывают наличие в допированных образцах небольшого количества  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ . Смещение рефлексов BFO на дифрактограммах в сторону больших углов  $2\theta$  является признаком встраивания ионов эрбия в кристаллическую решётку  $\text{BiFeO}_3$ . Методом просвечивающей электронной микроскопии выявлены морфологические характеристики образцов. По данным локального рентгеноспектрального микроанализа реальный состав допированных образцов  $\text{Er}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  очень близок к номинальному.

Синтезированные методом спрей-пиролиза порошки  $\text{Er}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  имеют форму частиц близкую к сферической, дисперсия по размерам находится в интервале 5–300 нм, преобладающее число частиц имеет размер в диапазоне 50–200 нм, агломерация выражена слабо. Уменьшение параметров кристаллической решетки и объема элементарной ячейки  $\text{Er}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  с ростом степени допирования ионами эрбия подтверждают встраивание  $\text{Er}^{3+}$  в кристаллическую решетку BFO в положение висмута.

**Ключевые слова:** нанопорошки, феррит висмута, мультиферроики, допирование

**Благодарности:** результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>.

**Для цитирования:** Томина Е. В., Павленко А. А., Куркин Н. А. Синтез нанопорошка феррита висмута, допированного ионами эрбия. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 93–100. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3309>

**For citation:** Tomina E. V., Pavlenko A. A., Kurkin N. A. Synthesis of bismuth ferrite nanopowder doped with erbium ions. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(1): 93–100. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3309>

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

© Томина Е. В., Павленко А. А., Куркин Н. А., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Среди материалов, относящихся к классу мультиферроиков, особый интерес вызывает феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$ . Симметрия кристалла ВФО допускает наличие линейного магнитоэлектрического эффекта и слабого ферромагнетизма при комнатной температуре [1–5]. Однако для объемного феррита висмута характерно наличие в магнитной структуре спиновой циклоиды, период которой составляет 62 нм. Это сводит слабый ферромагнетизм ВФО к нулю и препятствует появлению линейного магнитоэлектрического эффекта. Неоднородность магнитоэлектрического взаимодействия приводит к индуцированной пространственной модуляции спина спонтанной электрической поляризации. В первом приближении критерием степени поляризации может служить степень ромбоэдрического искажения ячейки — отношение  $c/a$ . Для разрушения спиновой циклоиды необходимо уменьшить отношение  $c/a$ , тем самым уменьшив степень поляризации, что приведет к перестройке спиновой структуры [6–11]. Синтез ВФО твердофазным методом является достаточно сложной задачей, поскольку система  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$  характеризуется образованием 3 промежуточных фаз:  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ ,  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ , однофазный  $\text{BiFeO}_3$  существует в очень узкой области составов, температуры и давления [12–16]. Уменьшение содержания примесей в ВФО требует продолжительной термической обработки, что сопровождается увеличением размера частиц целевого продукта. В отличие от твердофазного метода синтез нанопорошков методом спрей-пиролиза аэрозолей обладает такими преимуществами как достаточно высокая производительность, чистота целевого продукта, возможность контроля морфологии и малые энергозатраты. Поэтому целью работы являлся синтез нанопорошков  $\text{BiFeO}_3$  методом спрей-пиролиза с различной степенью допирования ионами  $\text{Er}^{3+}$ .

## 2. Экспериментальная часть

В работе в качестве прекурсоров были использованы кристаллогидраты  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  («ч.д.а.» ТУ 6-09-02-553-96),  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  («ч.д.а.» CAS 10035-06-0),  $\text{Er}_2(\text{SeO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (Ч ТУ 1083-63), винная кислота  $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$  (ГОСТ 5817-77), азотная кислота  $\text{HNO}_3$  (ГОСТ 4461-77). Образцы синтезировали методом спрей-пиролиза аналогично методике, представленной в [17]. При синтезе феррита висмута, допированного эрбием, концентрации ионов висму-

та и эрбия вычисляли по стехиометрическому соотношению:  $\text{Er}^{3+} : \text{Bi}^{3+} : \text{Fe}^{3+} = x : (1 - x) : 1$ , где  $x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$  — номинальная степень допирования.

В соответствии с этим соотношением кристаллогидраты селената эрбия, нитрата железа и нитрата висмута растворяли в азотной кислоте. Винную кислоту  $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ , взятую из расчета 3 моля кислоты на 2 моля ионов металлов, растворяли в дистиллированной воде и приливали к раствору нитратов металлов. Для проведения синтеза была собрана лабораторная установка спрей-пиролиза (рис. 1). Приготовленный раствор помещали в диспергатор, где он переводился в состояние аэрозоля с размером частиц от 0.8 до 2.0 мкм и потоком воздуха переносился в реакционную камеру печи МТП–2М, разогретую в самой горячей части до 760 °С. Температура контролировалась терморегулятором ОВЕН ТРМ1–Щ1.У.Р с погрешностью  $\pm 1$  °С. Скорость потока составляла 9 л/мин. Частицы аэрозоля находились в зоне реакции около 0.6 с. Под действием высокой температуры аэрозоль пиролитически разлагался с образованием целевого продукта. Частицы собирали пропусканием газа через стакан с дистиллированной водой, отфильтровывали, высушивали на воздухе.

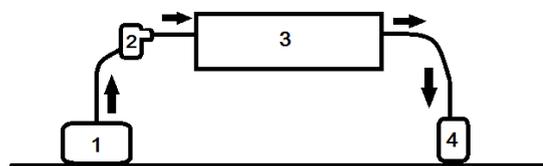


Рис. 1. Схема установки для спрей-пиролиза: 1 – компрессор, 2 – диспергатор, 3 – печь МТП–2М, 4 – стакан с дистиллированной водой для сбора нанопорошка

Определение фазового состава синтезированных порошков  $\text{BiFeO}_3$ ,  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}(5\%)$ ,  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}(10\%)$  осуществляли методом рентгенофазового анализа (РФА), рентгеновский дифрактометр RIGAKU SmartLab III с анодом  $\text{Co}$  ( $\lambda = 1.79030$  нм). Съемку проводили с шагом 0.010. Для исследования фазового состава образцов  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}(15\%)$  и  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}(20\%)$  методом РФА использовали рентгеновский дифрактометр Empyrean B.V. с анодом  $\text{Cu}$  ( $\lambda = 1.54060$  нм). Съемку проводили в интервале углов  $2\theta = 10\text{--}80^\circ$  с шагом 0.0200. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) по данным РФА синтезированных образцов феррита висмута рассчитывали по формуле Шеррера [18]:

$$D_{hkl} = \frac{kx\lambda}{\beta_{hkl} \times \cos\theta},$$

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.

Определение количественного элементного состава синтезированных образцов проводили методом локального рентгеноспектрального микроанализа (ЛРСМА, растровый электронный микроскоп JEOL-6510LV с системой энергодисперсионного микроанализа Bruker).

Размер и морфологию частиц порошков ВФО определяли по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, просвечивающий электронный микроскоп Carl Zeiss Libra-120).

Для полуколичественной оценки содержания примесных фаз в синтезированных нанопорошках ВФО проводили полуколичественный анализ дифрактограмм методом «корундовых чисел» с использованием формулы:

$$\omega_k = \frac{\frac{I_k^{\max}}{RIR_k}}{\sum_i \frac{I_i^{\max}}{RIR_i}},$$

где:  $\omega_k$  – массовая доля фазы  $k$ ,  $I_k^{\max}$  – интенсивность самого большого рефлекса фазы  $k$ ,  $RIR_k$  – корундовое число фазы  $k$ ,  $I_i^{\max}$  – интенсивности самых больших рефлексов  $i$  фаз,  $RIR_i$  – корундовые числа  $i$  фаз.

### 3. Результаты и обсуждения

Из данных рентгенофазового анализа (рис. 2 и 3) видно, что синтезированные образцы представляют собой в основном ортоферрит висмута  $\text{BiFeO}_3$  (номер карты 73-0548) [19]. Однако присутствуют единичные рефлексы фаз  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  (номера карт 46-0416, 72-1832). Полуколичественная оценка содержания примесных фаз в синтезированных образцах методом «корундовых чисел» демонстрирует тенденцию увеличения количества  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  с ростом степени допирования ВФО ионами  $\text{Er}^{3+}$  (табл. 1), что, возможно, связано с нарастани-

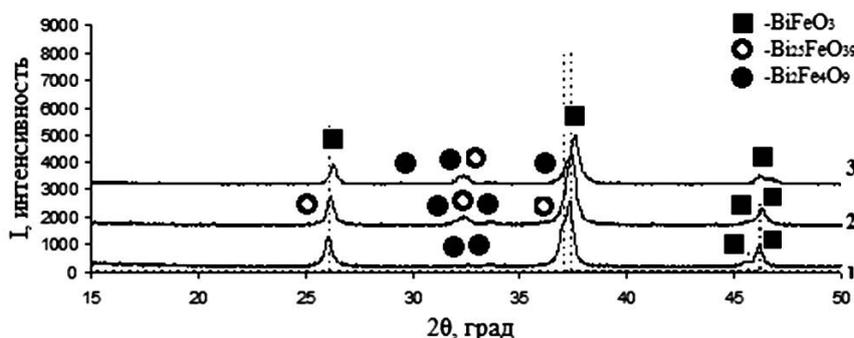


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов  $\text{BiFeO}_3$  (1),  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}$  (5 %) (2) и  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}$  (10 %) (3). Пунктиром обозначены рефлексы эталона  $\text{BiFeO}_3$  (номер карты 73-0548)

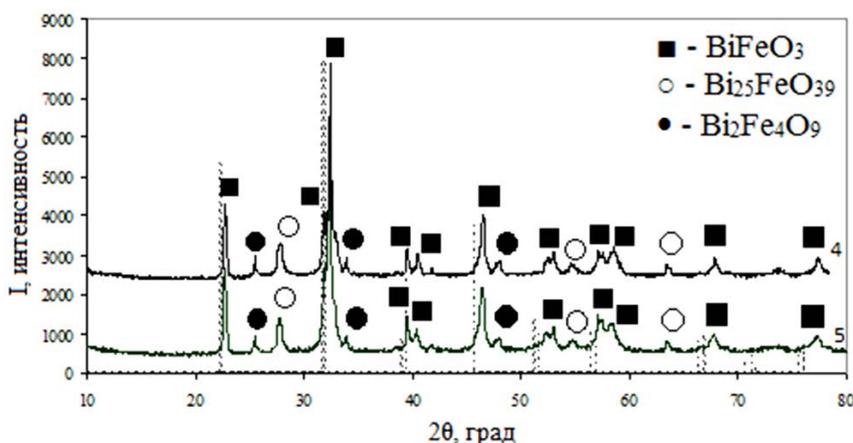


Рис. 3. Дифрактограмма образца  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}$  (15%) (4) и дифрактограмма образца  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}$  (20%) (5). Пунктиром обозначены рефлексы эталона  $\text{BiFeO}_3$  (номер карты 73-0548)

**Таблица. 1.** Состав синтезированных образцов, рассчитанный методом «корундовых чисел»

Фаза, масс. %	Образцы				
	BiFeO <sub>3</sub>	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (5 %)	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (10 %)	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (15 %)	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (20 %)
BiFeO <sub>3</sub>	95.7 %	84.3 %	72.6 %	75.4 %	72.1 %
Bi <sub>25</sub> FeO <sub>39</sub>	0.0 %	12.0 %	19.1 %	15.7 %	16.4 %
Bi <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	4.3 %	3.7 %	8.3 %	8.9 %	11.5 %

ем искажений кристаллической решетки феррита висмута.

При наложении дифрактограмм, снятых на одном дифрактометре (рис. 2 и рис. 3 соответственно) заметен сдвиг рефлексов допированных эрбием образцов BFO относительно нелегированного образца BiFeO<sub>3</sub> в сторону больших значений углов 2θ, что свидетельствует об искажении кристаллической решетки за счет внедрения иона с меньшим ионным радиусом на место иона с большим ионным радиусом [20]. Поскольку радиус иона Er<sup>3+</sup> составляет 0.089 нм, а ионов Bi<sup>3+</sup> и Fe<sup>3+</sup> 0.120 нм и 0.064 нм соответственно [21], можно предположить, что эрбий встраивается в решетку феррита в положение висмута. Это подтверждается уменьшением параметров кристаллической решетки и объема элементарной ячейки с возрастанием степени допирования феррита висмута ионами эрбия (табл. 2).

На энергодисперсионных спектрах синтезированных образцов Er<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>FeO<sub>3</sub> регистрируются не только сигналы Bi, Fe и O, но также и Er (рис. 4), что еще раз подтверждает встраивание ионов эрбия в решетку BFO. С увеличением степени допирования феррита висмута интенсивность сигналов эрбия в синтезированных образцах закономерно возрастает. Тем не менее, реальный состав синтезированных образцов BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(5 %), BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(10 %) и BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(15 %) несколько отличается от номинального (табл. 3), что объясняется содержанием некоторого количества примесных фаз Bi<sub>25</sub>FeO<sub>39</sub> и Bi<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>9</sub> в допированных нанопорошках BFO.

Оценка размера ОКР по данным РФА приведена в табл. 4. Среднее значение ОКР частиц образцов Er<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>FeO<sub>3</sub> находится в интервале от 19 до 27 нм, несколько возрастая с увеличением

**Таблица. 2.** Параметры решетки и объем элементарной ячейки образцов BiFeO<sub>3</sub>: BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(5 %), BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(10 %), BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(15 %) и BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(20 %), синтезированных методом спрей-пиролиза (расчет осуществляли для гексагональной упаковки)

Параметры решетки	Эталон, BiFeO <sub>3</sub> Карточка 73-0548	BiFeO <sub>3</sub>	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (5 %)	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (10 %)	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (15 %)	BiFeO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup> (20 %)
a, Å	5.58	5.58	5.56	5.55	5.46	5.44
c, Å	13.90	13.85	13.82	13.71	13.67	13.66
V, Å <sup>3</sup>	374.81	373.41	370.68	369.09	352.71	350.75

**Таблица 3.** Результаты ЛРСМА образцов BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(5 %), BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(10 %) и BiFeO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>(15 %)

Номинальный состав образцов (Н)			Er <sub>0.05</sub> Bi <sub>0.95</sub> FeO <sub>3</sub>	Er <sub>0.10</sub> Bi <sub>0.90</sub> FeO <sub>3</sub>	Er <sub>0.15</sub> Bi <sub>0.85</sub> FeO <sub>3</sub>
Элементный состав, ат. %	Er	Н	1.00	2.00	3.00
		Р	1.17	2.24	3.32
	Bi	Н	19.00	18.00	17.00
		Р	18.07	18.00	15.72
	Fe	Н	20.00	20.00	20.00
		Р	20.09	19.76	20.96
O	Н	60.00	60.00	60.00	
	Р	59.83	60.00	60.00	
Реальный состав образцов (Р)			Er <sub>0.05</sub> Bi <sub>0.90</sub> FeO <sub>2.98</sub>	Er <sub>0.11</sub> Bi <sub>0.91</sub> FeO <sub>3</sub>	Er <sub>0.16</sub> Bi <sub>0.75</sub> FeO <sub>2.86</sub>

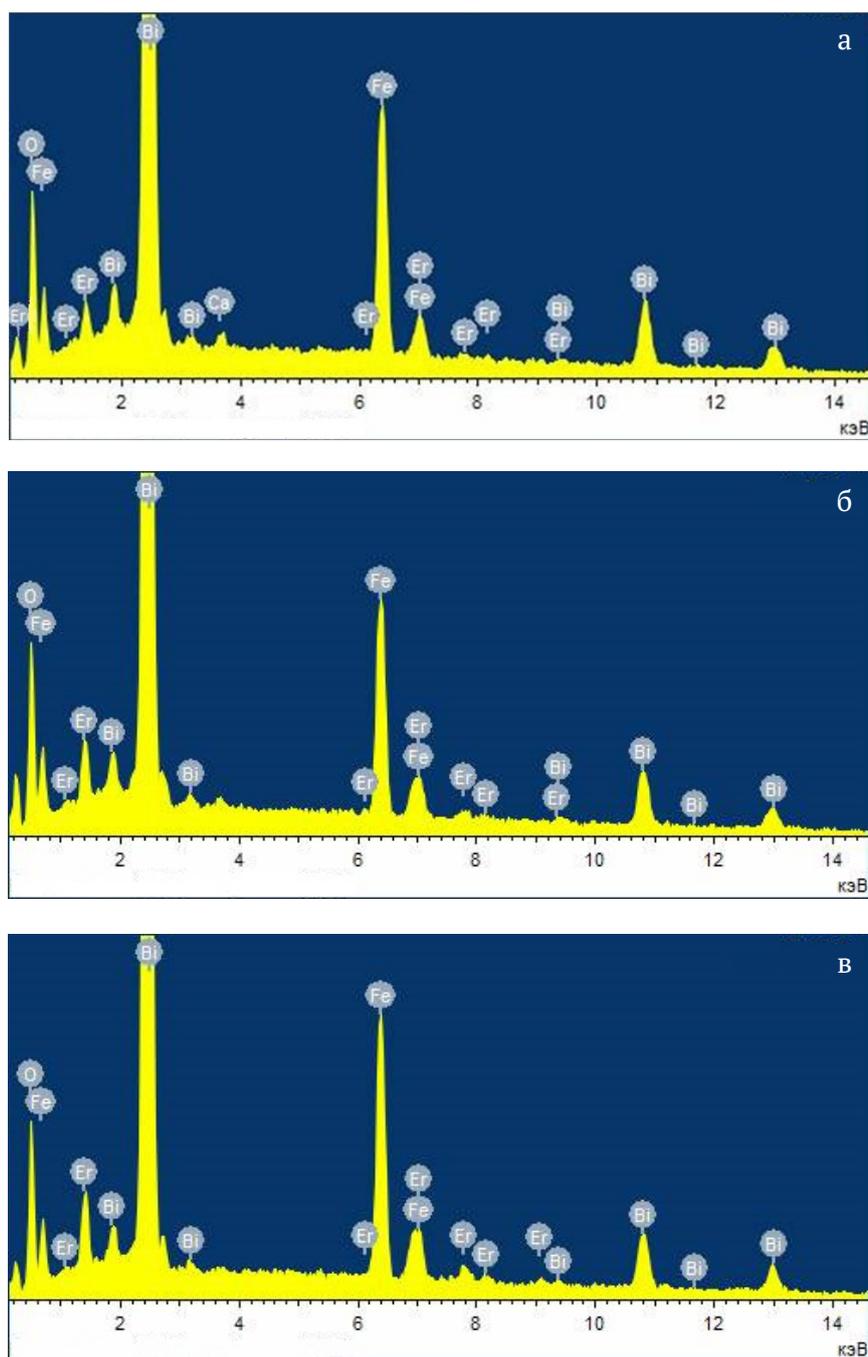


Рис. 4. Энергодисперсионные спектры образцов: а)  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}$  (5 %); б)  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}$  (10 %), в)  $\text{BiFeO}_3:\text{Er}^{3+}$  (15 %), синтезированных методом спрей-пиролиза

Таблица 4. Значения ОКР частиц образцов  $\text{Er}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ , синтезированных методом спрей-пиролиза

Диаметр ОКР частиц, нм	$\text{BiFeO}_3$	$\text{Er}_{0.05}\text{Bi}_{0.95}\text{FeO}_3$	$\text{Er}_{0.10}\text{Bi}_{0.90}\text{FeO}_3$	$\text{Er}_{0.15}\text{Bi}_{0.85}\text{FeO}_3$	$\text{Er}_{0.20}\text{Bi}_{0.80}\text{FeO}_3$
$D_1$	$22 \pm 2$	$22 \pm 2$	$22 \pm 2$	$26 \pm 3$	$30 \pm 3$
$D_2$	$14 \pm 1$	$16 \pm 2$	$16 \pm 2$	$21 \pm 2$	$26 \pm 3$
$D_3$	$18 \pm 2$	$18 \pm 2$	$23 \pm 2$	$23 \pm 2$	$26 \pm 3$
$D_{\text{cp}}$	$18 \pm 2$	$19 \pm 2$	$20 \pm 2$	$23 \pm 2$	$27 \pm 3$

ем номинальной степени допирования ВFO ионами  $\text{Er}^{3+}$  от 0.05 до 0.20.

По данным ПЭМ (рис. 5) частицы  $\text{Er}_{0.05}\text{Bi}_{0.95}\text{FeO}_3$  имеют форму, близкую к сферической, размер частиц не превышает 300 нм, преобладающая фракция частиц находится в интервале 51–100 нм. Для образца с большей степенью допирования  $\text{Er}_{0.15}\text{Bi}_{0.85}\text{FeO}_3$  наблюдается слабо выраженная агломерация (рис. 6), и, хотя размер частиц по-прежнему не превышает 300 нм, большая часть частиц имеет размер в диапазоне 101–200 нм.

#### 4. Выводы

Установлено, что метод спрей-пиролиза позволяет синтезировать нанопорошки феррита

висмута с различной степенью допирования эрбием с выраженной кристаллическостью, малой степенью агломерации, формой, близкой к сферической, и преобладающим размером частиц в диапазоне 50–200 нм. Сдвиг рефлексов феррита висмута на дифрактограммах в сторону больших значений углов  $2\theta$ , уменьшение параметров решетки и объема элементарной ячейки образцов  $\text{Er}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  с увеличением степени допирования ионами эрбия указывают на встраивание ионов эрбия в кристаллическую решетку феррита в положение висмута.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных

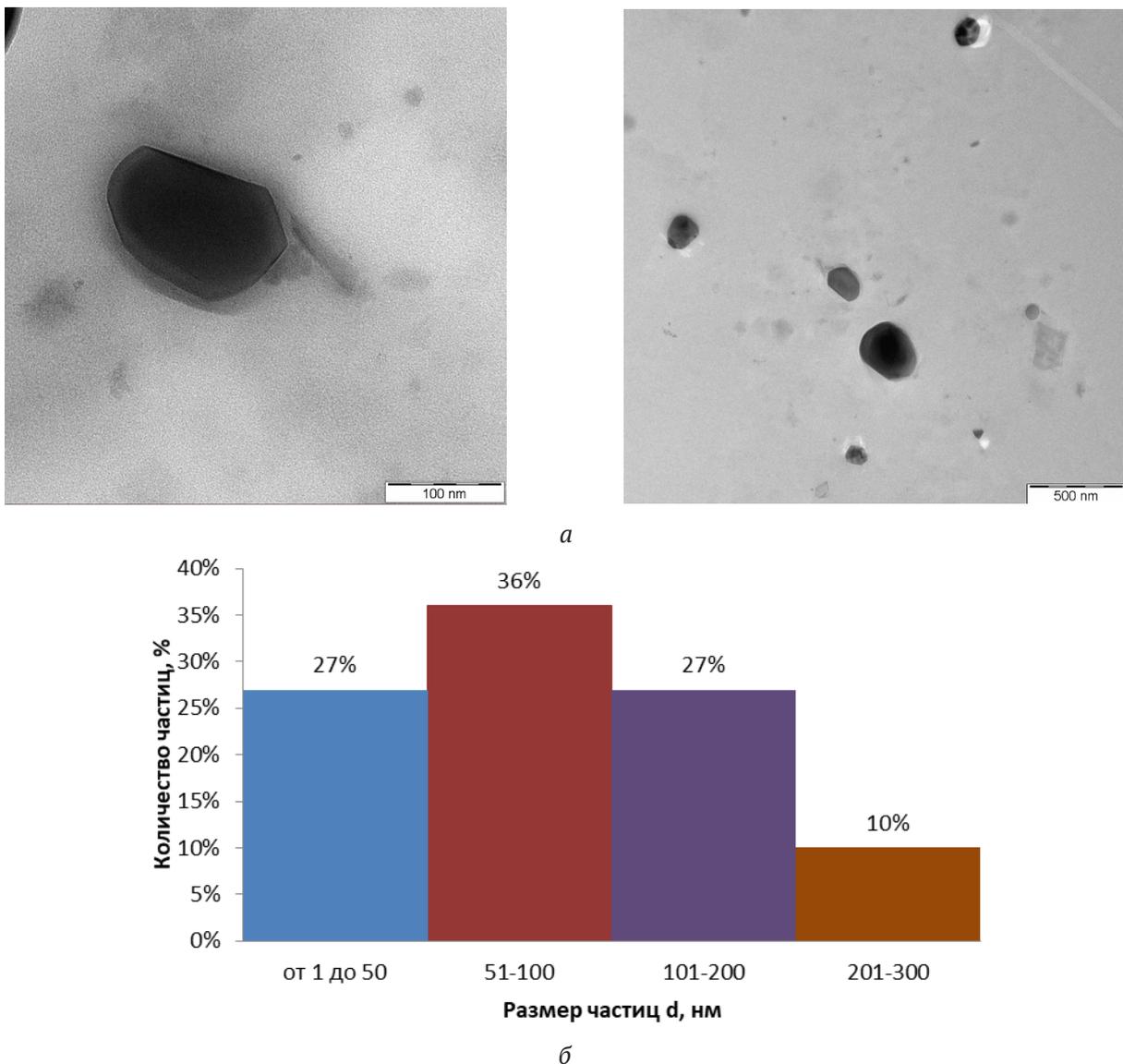
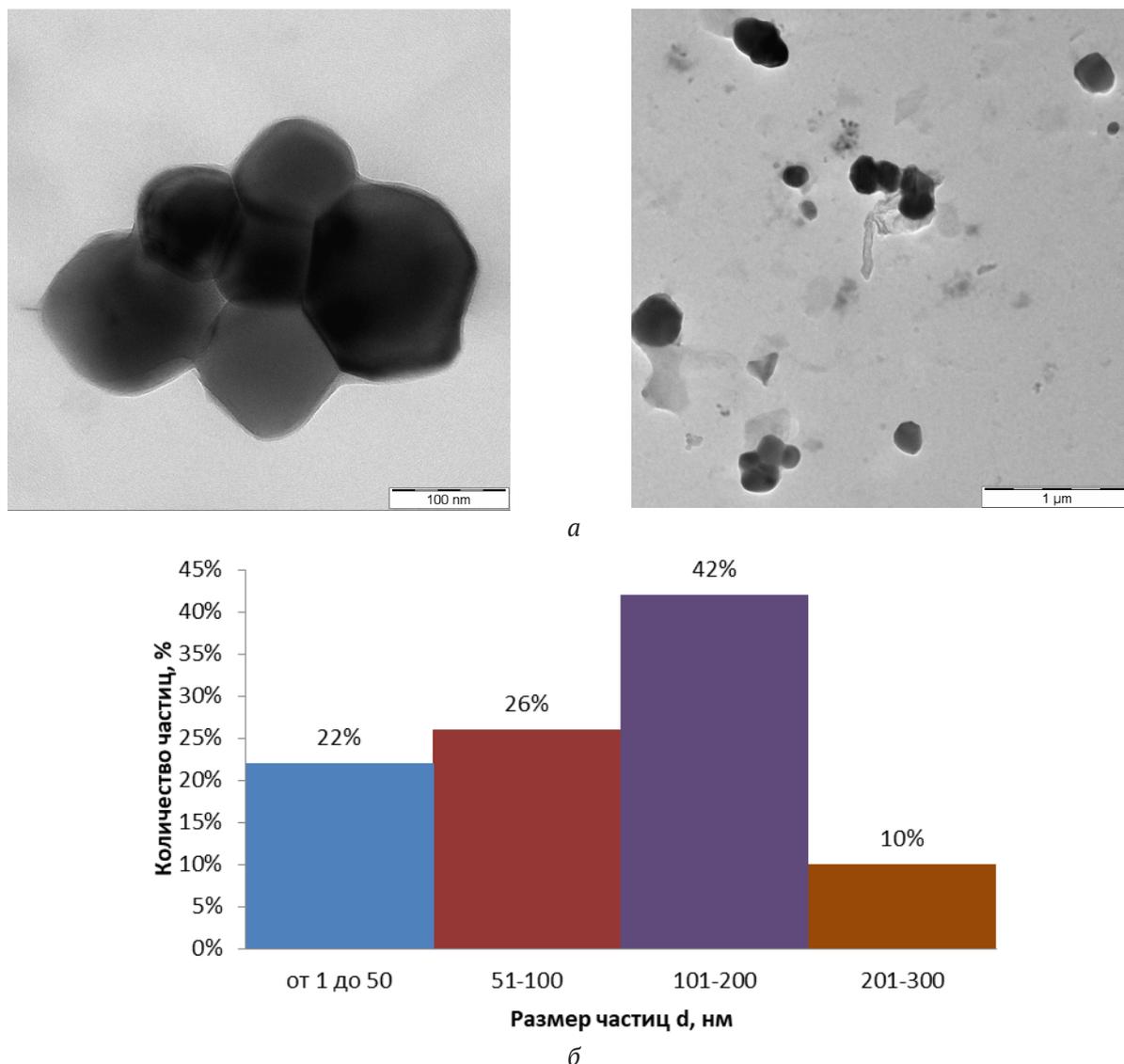


Рис. 5. ПЭМ изображения (а) образца  $\text{Er}_{0.05}\text{Bi}_{0.95}\text{FeO}_3$ , синтезированного методом спрей-пиролиза, в желатиновом слое и гистограмма распределения частиц по размерам (б)



**Рис. 6.** ПЭМ изображения (а) образца  $\text{Er}_{0.15}\text{Bi}_{0.85}\text{FeO}_3$ , синтезированного методом спрей-пиролиза, в желатиновом слое и гистограмма распределения частиц по размерам (б)

отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

1. Dai Z, Fujita Y., Akishige Y. Dielectric properties and heating effect of multiferroic  $\text{BiFeO}_3$  suspension. *Materials Letters*. 2011;63(13): 2036–2039. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.04.029>
2. Lin Z., Cai W., Jiang W., Fu Ch., Li Ch., Song Y. *Ceramics International*. 2013;39(8): 8729–8736. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.04.058>
3. Selbach S. M., Tybell T., Einarsrud M. A., T. Grande. *Chemistry of Materials*. 2007;19(26): 6478–6484. <https://doi.org/10.1021/cm071827w>
4. Shirokov V. B., Golovko Yu. I., Mukhortov V. M. *Technical Physics*. 2014;59(1): 102–106. <https://doi.org/10.1134/s1063784214010174>
5. Karthikeyan K., Thirumoorthi A. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2018;9: 631–640. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2018-9-5-631-640>
6. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005;38(8): R123–R152. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/8/r01>
7. Eerenstein W., Mathur N. D., Scott J. F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature*. 2006;442(7104): 759–765. <https://doi.org/10.1038/nature05023>
8. Cheong S.-W., Mostvov M. Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity. *Nature Materials*. 2007;6(1): 13–20. <https://doi.org/10.1038/nmat1804>
9. Ramesh R., Spaldin N.A. Multiferroics: progress and prospects in thin films. *Nature Materials*. 2007;6(1): 21–29. <https://doi.org/10.1038/nmat1805>

10. Tokura Y. Multiferroics—toward strong coupling between magnetization and polarization in a solid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;310(2): 1145–1150. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.11.198>
11. Catalan G., Scott J. F. Physics and applications of bismuth ferrite. *Advanced Materials*. 2009;21(24): 2463–2485. <https://doi.org/10.1002/adma.200802849>
12. Morozov M. I., Lomanova N. A., Gusarov V. V. Specific features of BiFeO<sub>3</sub> formation in a mixture of bismuth(III) and iron(III) oxides. *Russian Journal of General Chemistry*. 2003;73(11): 1676–1680. <https://doi.org/10.1023/b:rugc.0000018640.30953.70>
13. Liu T., Xu Y., Zhao J. Low-temperature synthesis of BiFeO<sub>3</sub> via PVA sol-gel route. *Journal of the American Ceramic Society*. 2010;93(11): 3637–3641. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03945.x>
14. Feroze A., Idrees M., Kim D. K., Nadeem M., Siddiqi S. A., Shaukat S. F., Atif M., Siddique M. Low temperature synthesis and properties of BiFeO<sub>3</sub>. *Journal of Electronic Materials*. 2017;46(7): 4582–4589. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5463-3>
15. Egorysheva A. V., Kuvshinova T. B., Volodin V. D., Ellert O. G., Efimov N. N., Skorikov V. M., Baranchikov A. E., Novotortsev V. M. Synthesis of high-purity nanocrystalline BiFeO<sub>3</sub>. *Inorganic Materials*. 2013;49(3): 310–314. <https://doi.org/10.1134/s0020168513030035>
16. Selbach S. M., Tybell T., Einarsrud M. A., Grande T. Phase transitions, electrical conductivity and chemical stability of BiFeO<sub>3</sub> at high temperatures. *Journal of Solid State Chemistry*. 2010;183(5): 1205–1208. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2010.03.014>
17. Tomina E. V., Lastochkin D. A., Maltsev S. A. The synthesis of nanophosphors YP<sub>x</sub>V<sub>1-x</sub>O<sub>4</sub> by spray pyrolysis and microwave methods. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020;22(4): 496–503. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3120>
18. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М: Техносфера; 2004. 384.
19. JCPDC PCPDFWIN: A Windows Retrieval/Display program for Accessing the ICDD PDF – 2 Data base, International Centre for Diffraction Data, 1997.
20. Bhat I., Husain S., Khan W., Patil S. I. Effect of Zn doping on structural, magnetic and dielectric properties of LaFeO<sub>3</sub> synthesized through sol-gel auto-combustion process. *Materials Research Bulletin*. 2013;48(11): 4506–4512. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.07.028>
21. Третьяков Ю. Д. [и др.]. Неорганическая химия. Химия элементов: учебник для студ. вузов, обуч. по направлению 510500 «Химия» и специальности 011000 «Химия»: в 2 т. М: Академкнига; 2007. Т. 1. 538 с.; Т. 2. 670 с.

### Информация об авторах

Томина Елена Викторовна, д. х. н., зав. кафедрой химии, Воронежский государственный лесотехнический университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tomina-e-v@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>.

Павленко Анна Андреевна, магистрант 1 года обучения, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: anna.pavlienko.1999@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4899-609X>

Куркин Николай Андреевич, магистрант 2 года обучения, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kurkin.nik@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0468-8207>

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 17.01.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована онлайн 25.03.2021.