



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 542.943:546.682'18'22

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9061>

**Структура и магнитные свойства нанопорошков  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$ , синтезированных методом совместного осаждения**

Хоанг Бао Ханг<sup>1</sup>, В. О. Миттова<sup>2</sup>, Нгуен Ань Тьен<sup>1</sup>, Фам Тхи Хонг Зуен<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup>Педагогический университет Хошимина,  
Хошимин 700000, Вьетнам

<sup>2</sup>Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко,  
Студенческая ул., 10, Воронеж 394036, Российская Федерация

<sup>3</sup>Университет Тху Дау Мот,  
провинция Биньзыонг 590000, Вьетнам

**Аннотация**

Совместным осаждением с применением в качестве осадителя водного раствора NaOH и последующего отжига при 800 °С в течение 60 минут синтезирован нанокристаллический феррит меди (II) со структурой шпинели, допированный гольмием. Предел допирования определен методом рентгенофазового анализа. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа установлена близость реального и номинального составов допированных образцов. Полученные частицы имеют приблизительно сферическую форму, а их размер составляет 40–70 нм (рентгенофазовый анализ, просвечивающая электронная микроскопия). Введение катионов  $\text{Ho}^{3+}$  до  $x = 0.15$  в решетку шпинели  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  приводит к уменьшению среднего размера кристаллитов, росту коэрцитивной силы нанопорошков, снижению избыточной намагниченности и намагниченности насыщения. Синтезированные нанопорошки  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.1$  и  $0.15$ ) являются магнитножесткими материалами с большой коэрцитивной силой.

**Ключевые слова:**  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ , Ho-допирование, метод соосаждения, магнитные свойства

**Для цитирования:** Хоанг Б. Х., Миттова В. О., Нгуен А. Т., Фам Т. Х. З. Структура и магнитные свойства нанопорошков  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$ , синтезированных методом совместного осаждения. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(1): 109–115. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9061>

**For citation:** Hoang B. K., Mittova V. O., Nguyen A. T., Pham T. H. D. Structural and magnetic properties of Ho-doped  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles prepared by a simple co-precipitation method. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(1): 109–115. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9061>

✉ Фам Тхи Хонг Зуен, e-mail: [duyenpth@tdmu.edu.vn](mailto:duyenpth@tdmu.edu.vn)

© Hoang B. K., Mittova V. O., Nguyen A. T., Pham T. H. D., 2022



## 1. Введение

Синтезу и изучению характеристик наноматериалов в настоящее время уделяется большое внимание, поскольку наночастицы имеют комплекс свойств, отличающихся от таковых для макроразмерных аналогов [1–5]. Среди магнитных материалов нанокристаллические ферриты со структурой шпинели типа  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  ( $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Cu}$ ) выделяются высокими значениями магнитной проницаемости, намагниченности насыщения и используются для создания новых многофункциональных материалов, таких как высокочастотные устройства, из-за уменьшения энергии токов Фуко и соответственно повышения продолжительности их функционирования [4, 6–9]. Кроме того, ферриты со структурой шпинели дешевле и стабильнее (по времени и температуре) по сравнению с металлами и сплавами.

Ферриты со структурой шпинели  $\text{MFe}_2\text{O}_4$ , допированные различными катионами металлов, обычно синтезируют такими методами, как золь-гель технология [6–9], гидротермальный синтез [10], твердофазная реакция [11] или метод совместного осаждения с добавлением органических соединений [12]. В работах [4, 13] описаны особенности формирования нанопорошков ферритов – шпинелей  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  ( $\text{M} = \text{Zn}, \text{Co}, \text{Ni}$ ) простым методом совместного осаждения через гидролиз катионов в кипящей воде с последующим добавлением соответствующих осадителей в отсутствие поверхностно активных веществ (ПАВ). По данным литературных источников,  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  в виде нанокристаллов, допированных гольмием ( $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$ ), аналогичным способом не синтезировали.

Таким образом, цель настоящей работы – синтез и исследование магнитных свойств нанокристаллического феррита – шпинели меди (II), допированного гольмием, сформированного простым химическим методом соосаждения.

## 2. Экспериментальная часть

Исходными веществами служили водные растворы нитратов меди (II), железа (III) и гольмия (III) «х. ч.» с мольным соотношением  $\text{Cu}^{2+} : \text{Fe}^{3+} : \text{Ho}^{3+} = 1 : (2-x) : x$  ( $x = 0, 0.1, 0.15$  и  $0.2$ ). В качестве осадителя применяли водный раствор  $\text{NaOH}$ . К 450 мл кипящей воды при перемешивании магнитной мешалкой по каплям добавляли 50 мл водного раствора смеси солей  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . После введения солей кипячение продолжали ещё 10 мин, при этом раствор приобретал ко-

ричнево-красный цвет, затем систему охлаждали до комнатной температуры и к ней по каплям добавляли 5%-й раствор  $\text{NaOH}$  для полного осаждения катионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$  аналогично [13–14]. Полученный осадок перемешивали в течение 60 минут, после чего осаждали в течение 15 минут. После отделения на вакуум-фильтре осадок промывали дистиллированной водой до достижения уровня  $\text{pH} \sim 7.0$  и высушивали при комнатной температуре. Отжиг проводили в муфельной печи при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 мин. Такой режим отжига бы выбран на основе результатов работ [13, 15].

Фазовый состав образцов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА, дифрактометр D8-ADVANCE,  $\text{CuK}_\alpha$ -излучение,  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 10\text{--}80^\circ$ ). Средний размер кристаллов ( $D_{\text{ср}}$ , нм) образцов  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  рассчитывали по формуле Шеррера.

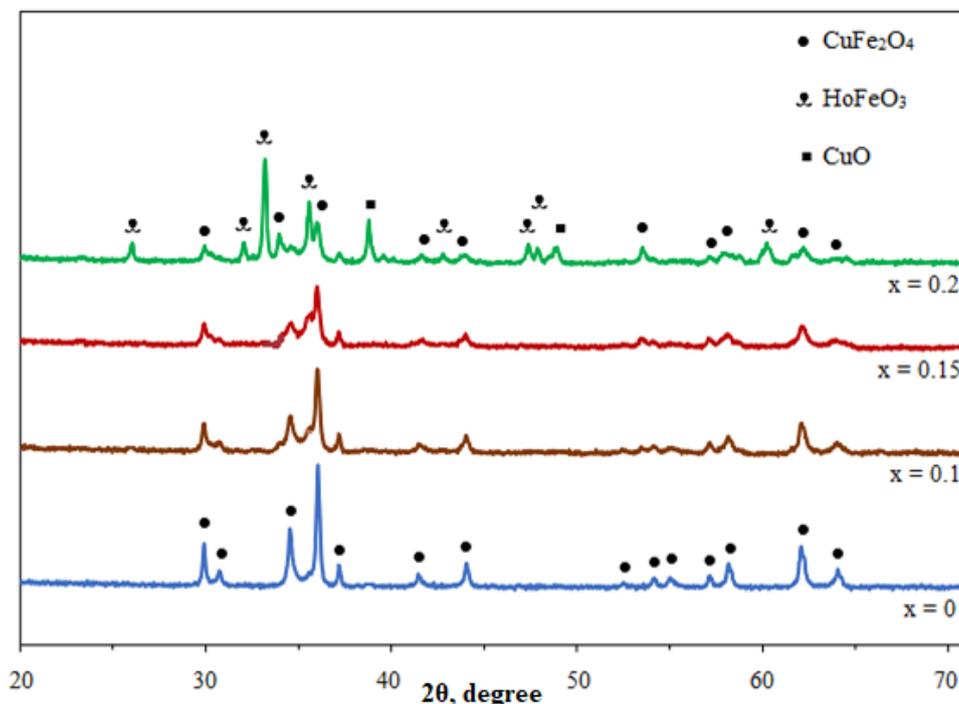
Форму и размер частиц определяли по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, электронный микроскоп JEM-1400).

Реальный качественный и количественный элементный состав образцов исследовали посредством энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) с использованием сканирующего электронного микроскопа FE-SEM S-4800. Количественный элементный состав определяли как среднее для значений, полученных в пяти разных точках каждого образца.

Петля гистерезиса и магнитные характеристики нанопорошков  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.1, 0.15$  и  $0.2$ ) при комнатной температуре, в том числе намагниченность насыщения ( $M_s$ ), коэрцитивная сила ( $H_c$ , Э) и остаточная намагниченность ( $M_r$ ), были зарегистрированы с помощью магнетометра Microsene EV11 с вибрирующим образцом под действием магнитного поля в диапазоне от  $-16\ 000$  до  $+16\ 000$  Э.

## 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены рентгеновские дифрактограммы порошков номинального состава  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.1, 0.15$  и  $0.2$ ), полученных методом совместного осаждения, после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 минут. Для образцов со значениями  $x = 0, 0.1$  и  $0.15$  были получены пики, соответствующие стандартным пикам шпинельной фазы  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  (JCPDS: 04-001-9258; Copper Iron Oxide). На дифрактограмме образца с номинальной степенью допирования  $x = 0.2$  помимо пиков фазы со структурой шпинели меди (II)  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ , присутствуют пики, отвечающие следу-



**Рис. 1.** Рентгеновские дифрактограммы образцов номинального состава  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$ , синтезированных методом совместного осаждения, после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 мин

ющим фазам:  $\text{CuO}$  (JCPDS: 04-004-5685; Copper Oxide) и  $\text{HoFeO}_3$  (JCPDS: 01-084-8725; Holmium Iron Oxide).

Таким образом, по данным РФА установлен предел допирования феррита – шпинели меди гольмием от  $x = 0.15$  до  $x = 0.2$  после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 минут. Предельный уровень допирования обусловлен разницей ионных радиусов замещаемого элемента и допанта, причем ионный радиус  $\text{Ho}^{3+}$  ( $r = 1.04 \text{ \AA}$ ) намного больше, чем ионный радиус  $\text{Fe}^{3+}$  ( $r = 0.65 \text{ \AA}$ ) [16–17]. Увеличение степени допирования в решетке  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  приводит к понижению значения угла  $2\theta$  для пика с высшей интенсивностью (табл. 1). Это ещё раз свидетельствует об успешном допировании феррита – шпинели меди гольмием и встраивании последнего в решетку  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ . Анализ размеров кристаллов, определенных по формуле Шеррера [18] по данным рентгенов-

ской дифрактометрии, показал уменьшение  $D_{\text{cp}}$  при повышении степени допирования феррита меди ионами  $\text{Ho}^{3+}$  от  $x = 0$  до  $x = 0.15$ , с последующим увеличением при  $x = 0.2$  (табл. 1). Такая аномалия при  $x = 0.2$  может быть связана с фазовой неоднородностью образцов при появлении двух примесных фаз ( $\text{CuO}$  и  $\text{HoFeO}_3$ ) (рис. 1), что вызывает ошибку расчета по формуле Шеррера. Уменьшение среднего размера кристаллов  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  ( $D_{\text{cp}}$ ) при повышении содержания катионов  $\text{Ho}^{3+}$  от  $x = 0.0$  до  $x = 0.15$  объясняется тем, что замена катионов  $\text{Fe}^{3+}$  ( $r = 0.65 \text{ \AA}$ ) на катионы  $\text{Ho}^{3+}$  с большим ионным радиусом ( $r = 1.04 \text{ \AA}$ ) вызывает возрастание дефектности решетки и соответственно повышенные внутренние напряжения, в результате чего тормозится рост кристаллов. Аналогичные результаты наблюдали в работе [19], в которой замена в решетке  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  ионов  $\text{Fe}^{3+}$  при допировании ка-

**Таблица 1.** Характеристики образцов  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_4$ , синтезированных методом совместного осаждения, после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 мин

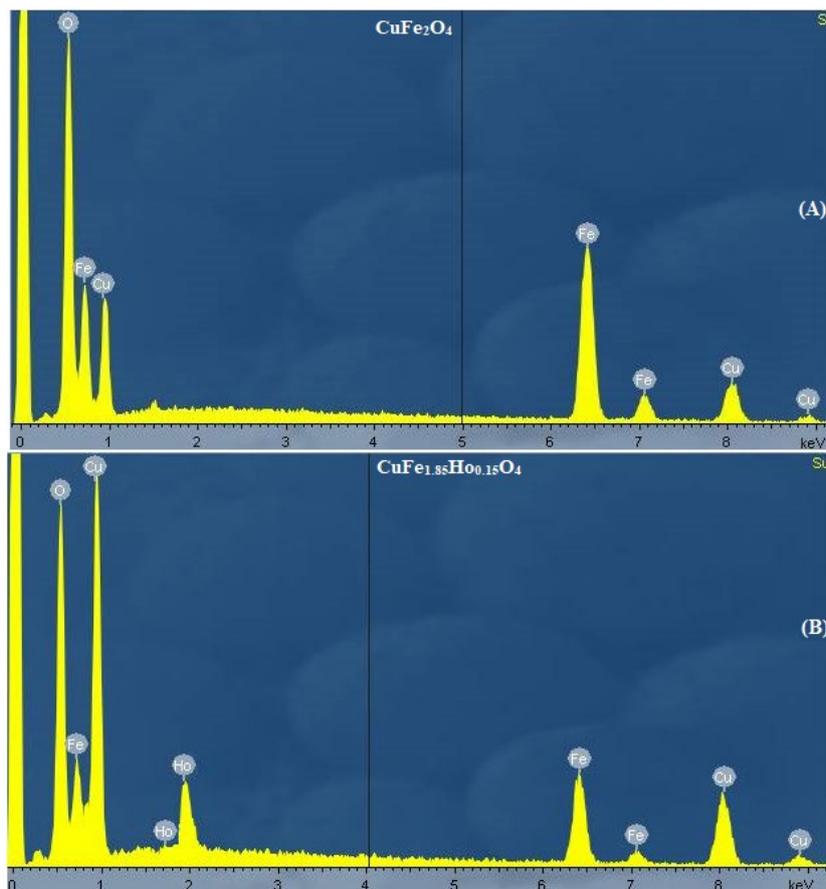
Образцы, номинальный состав	$2\theta, ^\circ$	$D_{\text{cp}}, \text{нм}$	$H_c, \text{Э}$	$M_r, \text{эме/г}$	$M_s, \text{эме/г}$
$\text{CuFe}_2\text{O}_4$	36.0510	54.6	940.72	13.03	23.64
$\text{CuFe}_{1.9}\text{Ho}_{0.1}\text{O}_4$	36.0301	46.2	1320.11	10.81	21.32
$\text{CuFe}_{1.85}\text{Ho}_{0.15}\text{O}_4$	36.0119	37.8	1501.12	9.15	18.29
$\text{CuFe}_{1.8}\text{Ho}_{0.2}\text{O}_4$	35.5868	42.9	1317.82	6.40	13.14

тионами  $\text{Ce}^{3+}$  ( $r = 1.14 \text{ \AA}$ ) приводит к уменьшению среднего размера кристаллов от 25.36 до 18.53 нм при изменении  $x$  от 0.0 до 0.5.

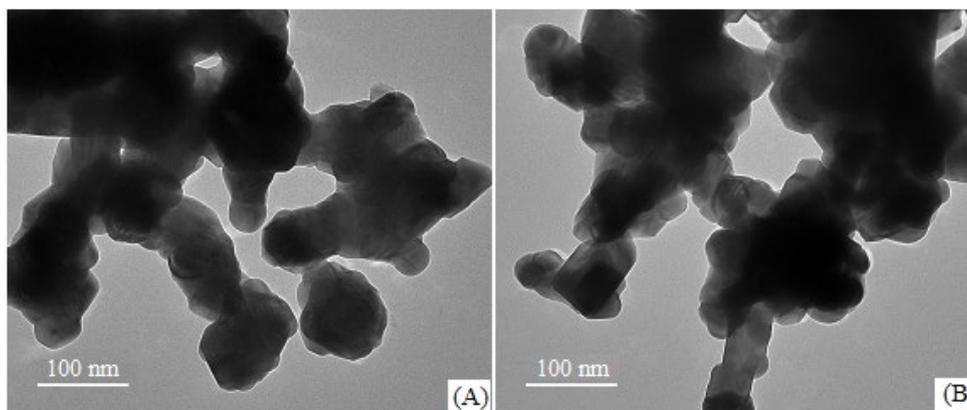
Определение реального элементного состава образцов  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  и  $\text{CuFe}_{1.85}\text{Ho}_{0.15}\text{FeO}_4$  показало, что пики наблюдались только для элементов Cu, Fe, O и Ho, причем содержание их было весьма близко к номинальному составу. Примесей других элементов обнаружено не было (рис. 2).

На рис. 3 представлены ПЭМ-изображения нанопорошков  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  (А) и  $\text{CuFe}_{1.85}\text{Ho}_{0.15}\text{O}_4$  (Б), отожжённых при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 мин. Видно, что полученные частицы имеют приблизительно сферическую форму, а их размер составляет 40–70 нм. Частицы в значительной степени агрегированы.

Исследование магнитных характеристик при комнатной температуре показало, что допирова-



**Рис. 2.** ЭДС-дифрактограммы образцов  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  (А) и  $\text{CuFe}_{1.85}\text{Ho}_{0.15}\text{O}_4$  (Б), синтезированных методом совместного осаждения, после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 мин



**Рис. 3.** ПЭМ-изображения наночастиц  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  (А) и  $\text{CuFe}_{1.85}\text{Ho}_{0.15}\text{O}_4$  (Б), синтезированных методом совместного осаждения, после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 мин

ние  $\text{Ho}^{3+}$  кристаллической решетки шпинели  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  повлияло не только на структурные характеристики кристаллов, но и на магнитные свойства нанопорошков  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  (рис. 4 и табл. 1).

Магнитные параметры, такие как избыточная намагниченность ( $M_r$ , эме/г) и намагниченность насыщения ( $M_s$ , эме/г) образцов  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  (номинальный состав  $x = 0; 0.1, 0.15$  и  $0.2$ ) после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 минут уменьшаются с ростом содержания  $\text{Ho}^{3+}$ , однако коэрцитивная сила ( $H_c$ , Э) увеличивается с ростом содержания допанта. Повышение значений коэрцитивной силы объясняется тем, что увеличение содержания допанта в кристаллах  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  приводит к повышению их магнитной анизотропии [20–21]. Независимо от содержания допанта, синтезированные нанопорошки  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  имеют высокие значения магнитных характеристик:  $H_c = 940.72 \div 1501.12$  Э,  $M_r = 13.03 \div 6.40$  эме/г,  $M_s = 23.64 \div 13.14$  эме/г, что открывает перспективы их применения как магнитножестких материалов для изготовления постоянных магнитов или магнитной записи на жестких дисках и лентах [20].

#### 4. Заключение

Синтезированы нанопорошки ферритов  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.1$  и  $0.15$ ) простым методом

соосаждения, осадитель – 5%-й водный раствор NaOH. Полученные образцы  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  после отжига осадков при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 минут имеют средний размер частиц  $40\text{--}70$  нм. Предел допирования  $\text{Ho}^{3+}$  феррита-шпинели  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  обнаружен при номинальном значении  $x = 0.15$ . Уменьшение среднего размера ( $D_{cp}$ ) кристаллов  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  при повышении содержания катионов  $\text{Ho}^{3+}$  от  $x = 0.0$  до  $x = 0.15$  объясняется тем, что замена катионов  $\text{Fe}^{3+}$  ( $r = 0.65 \text{ \AA}$ ) на катионы  $\text{Ho}^{3+}$  с большим ионным радиусом ( $r = 1.04 \text{ \AA}$ ) вызывает возрастание дефектности решетки и соответственно повышенные внутренние напряжения, в результате чего тормозится рост кристаллов. Синтезированные наночастицы  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$  характеризуются большими величинами коэрцитивной силы и избыточной намагниченности и соответственно являются магнитножесткими материалами.

#### Вклад авторов

Авторы внесли одинаковый вклад в работу, представленную в статье.

#### Конфликт интересов

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

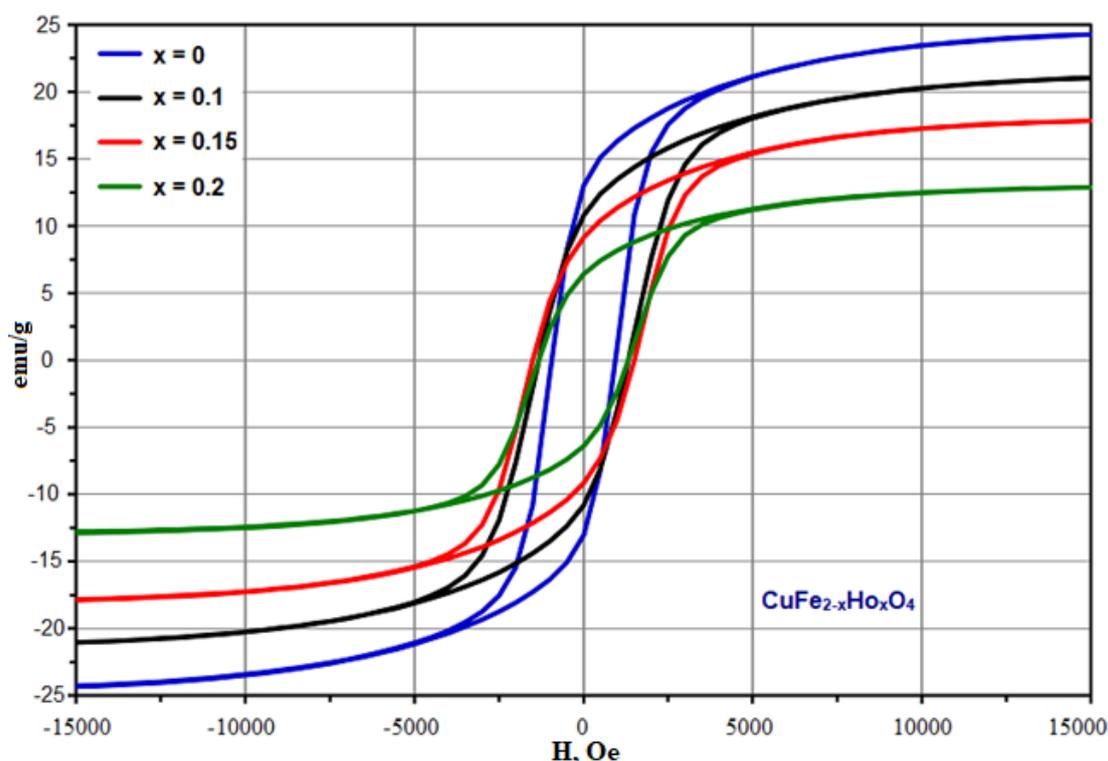


Рис. 4. Полевые зависимости намагниченности нанопорошков  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x\text{O}_4$ , синтезированных методом совместного осаждения, после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 60 мин

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

### Список литературы

1. Кнурова М. В., Миттова И. Я., Перов Н. С., Альмяшева О. В., Нгуен А. Т., Миттова В. О., Бессалова В. В., Вирютина Е. Л. Влияние степени допирования на размер и магнитные свойства нанокристаллов  $\text{La}_{1-x}\text{Zn}_x\text{FeO}_3$ , синтезированных золь-гель методом. *Журнал неорганической химии*. 2017;62(3): 275–282. <https://doi.org/10.7868/S0044457X17030084>
2. Bahadur A., Hussain W., Iqbal S., Ullah F., Shoab M., Liu G., Feng K. A morphology controlled surface sulfurized  $\text{CoMn}_2\text{O}_4$  microspike electrocatalyst for water splitting with excellent OER rate for binder-free electrocatalytic oxygen evolution. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021;20(9): 12255–12264. <https://doi.org/10.1039/D0TA09430G>
3. Бережная М. В., Миттова И. Я., Перов Н. С., Альмяшева О. В., Нгуен А. Т., Миттова В. О., Бессалова В. В., Вирютина Е. Л. Формирование нанопорошков феррита иттрия, допированного цинком, золь-гель методом. *Журнал неорганической химии*. 2018;63(6): 706–711. <https://doi.org/10.7868/S0044457X18060077>
4. Nguyen A. T., Phan P. H. N., Mittova I. Ya., Knurova M. V., Mittova V. O. The characterization of nanosized  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  material prepared by coprecipitation. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2016;7(3): 459–463. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-3-459-463>
5. Буи Х. В., Нгуен А. Т. Золь-гель синтез, кристаллическая структура и магнитные свойства нанокристаллического ортоферрита празеодима. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(2): 196–203. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3429>
6. Ngo T. P. H., Le T. K. Polyethylene glycol-assisted sol-gel synthesis of magnetic  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  powders as photo-fenton catalysts in the presence of oxalic acid. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2018;88: 211–219. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4783-y>
7. Huynh M. M., Do D. P., Tran T. N., Nguyen H. K. H., Tran Q. H., Luu T. X. T., Le T. K. Synthesis of magnetic  $\text{Mn}_2\text{O}_3/\text{CuFe}_2\text{O}_4$  catalysts for the aerobic oxidation synthesis of p-hydroxybenzaldehyde. *Catalysis Letters*. 2018;148: 924–932. <https://doi.org/10.1007/s10562-017-2293-0>
8. Sivakumar P., Ramesh R., Ramanand A., Ponunusamy S., Muthamizhchelvan C. Synthesis and characterization of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles and nanorods. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013;563: 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.02.077>
9. Hamid A., Niloofar S., Samane A., Samira G., Mohammad M. G., Ayat M., Nasibeh T. Nanocrystalline  $\text{CuFe}_{2-x}\text{Sm}_x\text{O}_4$ : synthesis, characterization and its photocatalytic degradation of methyl orange. *Journal of Materials Science: Materials in Electronic*. 2016;27: 4689–493. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4347-2>
10. Kesavan G., Nataraj. N., Chen S. M., Lin L. H. Hydrothermal synthesis of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles as an efficient electrocatalyst for the electrochemical detection of bisphenol A. *New Journal of Chemistry*. 2020;44: 7698–7707. <https://doi.org/10.1039/D0NJ00608D>
11. Douaa B., Muthafar F. A. H., Farah T. M. N. Structural and electrical properties of  $\text{CuLa}_y\text{Fe}_{2-y}\text{O}_4$  ferrites. *Iraqi Journal of Physics*. 2013;11(21): 102–109. Available at: <https://www.iasj.net/iasj/article/88008>
12. Hosseini S. A. Morphologies and magnetic properties of dysprosium doped copper ferrite by changing the types of chelating agent. *Journal of Materials Science: Materials in Electronic*. 2017;28: 1086–1091. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5632-9>
13. Nguyen A. T., Nguyen T. D., Mittova V. O., Berezhnaya M. V., Mittova I. Ya. Phase composition and magnetic properties of  $\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanocrystals with spinel structure, synthesized by Co-precipitation. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2017;8(3): 371–377. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2017-8-3-371-377>
14. Фам Т. Х. З., Нгуен А. Т. Оптические и магнитные свойства наноматериалов на основе ортоферрита  $\text{NdFeO}_3$ , синтезированных методом совместного осаждения. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 600–606. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3680>
15. Nguyen A. T., Nguyen T. T. L., Bui X. V., Nguyen T. H. D., Lieu D. H., Le T. M. L., Pham V. Optical and magnetic properties of  $\text{HoFeO}_3$  nanocrystals prepared by a simple co-precipitation method using ethanol. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;834: 155098. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155098>
16. Housecroft C. E., Sharpe A. G. *Inorganic Chemistry, 2nd edition*. Pearson: Prentice Hall; 2005. 987 p.
17. Vo Q. M., Mittova V. O., Nguyen V. H., Mittova I. Ya., Nguyen A. T. Strontium doping as a means of influencing the characteristics of neodymium orthoferrite nanocrystals synthesized by coprecipitation method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32: 26944–26954. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07068-x>
18. Mehdi R. N., Mohsen B., Ali S. N., Mansoureh R. J. Nanocrystalline Ce-doped copper ferrite: synthesis, characterization, and its photocatalyst application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2016;26: 11691–11697. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5305-8>
19. Elayakumar K., Manikandan A., Dinesh A., Thanrasu K., Kanmani K. R., Thilak R. K., Slimani Y.,

Jaganathan S. K., Baykal A. Enhanced magnetic property and antibacterial biomedical activity of  $\text{Ce}^{3+}$  doped  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  spinel nanoparticles synthesized by sol-gel method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019;478: 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.108>

20. Cullity B. D., Graham C. D. *Introduction to Magnetic Materials, 2<sup>nd</sup> ed.* Canada: John Wiley & Sons, Inc., Publication; 2009. 568 p.

21. Nguyen A. T., Pham L. T., Mittova I. Ya., Mittova V. O., Nguyen T. T. L., Nguyen V. H., Bui X. V. Co-doped  $\text{NdFeO}_3$  nanoparticles: synthesis, optical and magnetic properties study. *Nanomaterials*. 2021;11: 937. <https://doi.org/10.3390/nano11040937>

### Информация об авторах

Хоанг Бао Ханг, студент 3-го курса химического факультета, Педагогический университет Хошимина (Хошимин, Вьетнам).

<https://orcid.org/0000-0001-9029-1443>  
[hoangbaokhanhhcmue@gmail.com](mailto:hoangbaokhanhhcmue@gmail.com)

Миттова Валентина Олеговна, к. б. н., доцент кафедры клинической лабораторной диагностики Воронежского государственного медицинского университета имени Н. Н. Бурденко Министерства здравоохранения Российской Федерации (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9844-8684>  
[vmittova@mail.ru](mailto:vmittova@mail.ru)

Нгуен Ань Тьен, к. х. н., доцент, заведующий кафедрой неорганической химии, Педагогический университет (Хошимин, Вьетнам).

<https://orcid.org/0000-0002-4396-0349>  
[tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn)

Фам Тхи Хонг Зуен, магистр х. н., преподаватель Института прикладных технологий, Университет Тху Дау Мот (провинция Биньзыонг, Вьетнам).

<https://orcid.org/0000-0002-7350-0634>  
[duyenpth@tdmu.edu.vn](mailto:duyenpth@tdmu.edu.vn)

Поступила в редакцию 10.01.2022; одобрена после рецензирования 28.01.2022; принята к публикации 15.02.2022; опубликована онлайн 25.03.2022.