

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 542.943:546.682'18'22

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3680>

Оптические и магнитные свойства наноматериалов на основе ортоферрита NdFeO_3 , синтезированных методом совместного осаждения

Фам Ти Хонг Зуен¹, Нгуен Ань Тьен²✉

¹Университет Тху Дау Мот,
Тху Дау Мот, провинция Биньзыонг, 590000, Вьетнам

²Педагогический университет Хошимина
700000 Хошимин, Вьетнам

Аннотация

В работе описан процесс синтеза наноматериалов (размер частиц от 20 до 40 нм) на основе ортоферрита NdFeO_3 методом совместного осаждения посредством гидролиза катионов Nd(III) и Fe(III) в горячей воде с 5 % раствором NaOH в качестве осаждающего реактива. Однофазный NdFeO_3 был получен в результате кальцинации порошка непосредственно после отжига при температуре 700, 800 и 900 °C в течение часа. При комнатной температуре наблюдалось сильное поглощение излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазоне ($\lambda = 200\text{--}400$ и $400\text{--}600$ нм), а также низкое значение ширины запрещённой зоны ($E_g = 2.2\text{--}2.5$ эВ). Полученные наноматериалы на основе NdFeO_3 проявляют свойства магнитотвердых ферромагнетиков с высокой коэрцитивной силой ($H_c = 600\text{--}1600$ Э).

Ключевые слова: NdFeO_3 , наноматериалы, совместное осаждение, оптические и магнитные свойства

Для цитирования: Оптические и магнитные свойства наноматериалов на основе ортоферрита NdFeO_3 , синтезированных методом совместного осаждения. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 600–606. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3680>

For citation: Pham T. H. D., Nguyen A. T. Optical and magnetic properties of orthoferrite NdFeO_3 nanomaterials synthesized by simple co-precipitation method. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(4): 600–606. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3680>

✉ Нгуен Ань Тьен, e-mail: tienna@hcmue.edu.vn
© Pham T. H. D., Nguyen A. T., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Особенности структуры и свойства как наноматериалов вообще, так и наноматериалов на основе редкоземельных ортоферритов $RFeO_3$ в частности, зависят от ряда факторов, таких как размер и морфология частиц, размер кристаллов, распределение катионов в кристаллической решётке, содержание легирующих элементов и способ получения [1–5]. Наноразмерные редкоземельные ортоферриты $RFeO_3$ ($R = La, Y, Nd, Pr, Ho, \dots$) активно изучаются и находят применение в различных областях, включая фотокатализ, применяемый при разложении токсичных органических отходов [6–7], производство электродов для твёрдооксидных топливных элементов [8], получение газочувствительных материалов [9], фотомагнитные и электромагнитные устройства [10–11] и т. д. К числу материалов, представляющих значительный исследовательский интерес, относится и редкоземельный ортоферрит $NdFeO_3$. Исследования структуры, а также оптических, магнитных и электрических свойств ортоферрита неодима [12–15] показали, что его можно успешно использовать при адсорбции $As(V)$ [16].

Наноматериалы на основе $NdFeO_3$ получают различными способами, включая высокотемпературный механосинтез [14–15], золь-гель синтез и метод сгорания геля [16, 17–18], гидротермальный синтез и метод совместного осаждения с добавлением ПАВ [12–13]. В нашей предыдущей работе [19], посвящённой исследованию поведения $Fe(III)$, $Nd(III)$ и их смеси (молярное соотношение $Fe^{3+}/Nd^{3+} = 1/1$) в условиях термического воздействия, установлена оптимальная температура отжига для получения однофазного перовскита, а также методом совместного осаждения (без ПАВ) синтезированы наночастицы $NdFeO_3$ размером < 50 нм. Ранее мы уже получили путём совместного осаждения ряд редкоземельных ортоферритов $PrFeO_3$ [20], $HoFeO_3$ [21–22], $LaFeO_3$ [23] и $YFeO_3$ [24–25] и изучили их структурные особенности, а также оптические и магнитные свойства. Однако в [19] оптические и магнитные свойства наноматериалов на основе $NdFeO_3$ не рассматривались.

Данная работа является продолжением работы [19]. Цель исследования – изучить характерные оптические и магнитные свойства наноматериалов на основе ортоферрита $NdFeO_3$, синтезированных методом совместного осаждения без добавления ПАВ.

2. Экспериментальная часть

Нанопорошок ортоферрита $NdFeO_3$ получали методом совместного осаждения, описанным в [19]. В 400 мл кипящей воды, подогреваемой на магнитной мешалке при $T^\circ > 95$ °С, по каплям добавляли 50 мл водного раствора смеси солей $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ и $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (молярное соотношение 1/1). В результате получали золь красно-бурого цвета. Как показали исследования, посвящённые синтезу наноортоферритов $HoFeO_3$ и $YFeO_3$ [22, 24], постепенное добавление в воду при высокой температуре раствора солей $Fe(III)$ и $Nd(III)$ позволяет ускорить гидролиз катионов металла и ограничить размер получаемых частиц $NdFeO_3$. Затем к смеси по каплям добавляли 5-% раствор $NaOH$ до полного осаждения катионов Nd^{3+} и Fe^{3+} (т. е. пока фенолфталеиновая бумага не стала розовой). Полученную смесь перемешивали в течение ещё 60 минут, после чего осаждали в течение 20 минут. После отделения в вакуум-фильтре полученный осадок промывали водой до достижения уровня $pH \sim 7.0$. Далее осадок высушивали при комнатной температуре в течение 5–7 дней, а затем перемалывали в фарфоровой ступке до получения жёлто-коричневого мелкодисперсного порошка (прекурсора $NdFeO_3$). Затем прекурсор подвергался отжигу при температуре 700, 800 и 900 °С в течение часа с целью изучить процесс формирования однофазного орторомбического $NdFeO_3$.

Рентгенофазовый анализ (РФА) порошков $NdFeO_3$ проводился на дифрактометре D8-ADVANCE (Bruker, Германия) (CuK_α излучение, $\lambda = 0.154184$ нм, диапазон углов $2\theta = 10–80^\circ$, шаг сканирования $0.02^\circ/c$). Средний размер кристаллов (D_{PFA} , нм) образцов $Nd_{1-x}Sr_xFeO_3$ рассчитывался по формуле Шеррера, а параметры кристаллической решётки (a, b, c, V) рассчитывались способом, описанным в [13]. Морфология образцов определялась посредством просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа Joel JEM-1400 (Jeol Ltd., Япония).

Спектры поглощения излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазоне для наноматериалов на основе $NdFeO_3$ определялись с использованием спектрометров УФ и видимой области (UV-Vis, JASCO V-550, Япония). Оптическая ширина запрещенной зоны (E_g , эВ) рассчитывалась в соответствии со способом, описанным в [22]. Магнитные характеристики нанопорошков, такие как коэрцитивная сила (H_c , Э), остаточная намагниченность (M_r , эме/г) и намагниченность

насыщения (M_s , эме/г), исследовались при комнатной температуре с использованием магнитометра MICROSENE EV11 с вибрирующим образцом при максимальном магнитном поле ± 20 кЭ.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены дифрактограммы прекурсора наноортоферрита $NdFeO_3$ после отжига при температуре 700, 800 и 900 °C в течение часа. На всех трёх дифрактограммах наблюдается однофазный ортоферрит $NdFeO_3$ с орторомбической структурой, (группа $Pbnm$ (62)).

Все наблюдаемые закономерности соответствуют стандартным пикам $NdFeO_3$ (согласно базе данных JCPDS: 01-074-1473). В соответствии с формулой Шеррера при увеличении тем-

пературы отжига увеличивается также степень кристалличности (I , имп.), объём кристаллической решётки (V , Å³) и средний размер кристаллов $NdFeO_3$ (табл. 1).

Морфология $NdFeO_3$ после отжига при 800 °C в течение часа исследовалась посредством просвечивающей электронной микроскопии (рис. 2), которая выявила частицы размером 20-40 нм с чёткими границами. Значительная агрегация частиц объясняется тем, что притяжение между магнитными частицами замедляет рассеяние электронов в ходе ПЭМ.

При комнатной температуре спектры поглощения излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазоне для образцов $NdFeO_3$, отожжённых при различных температурах (700, 800 и

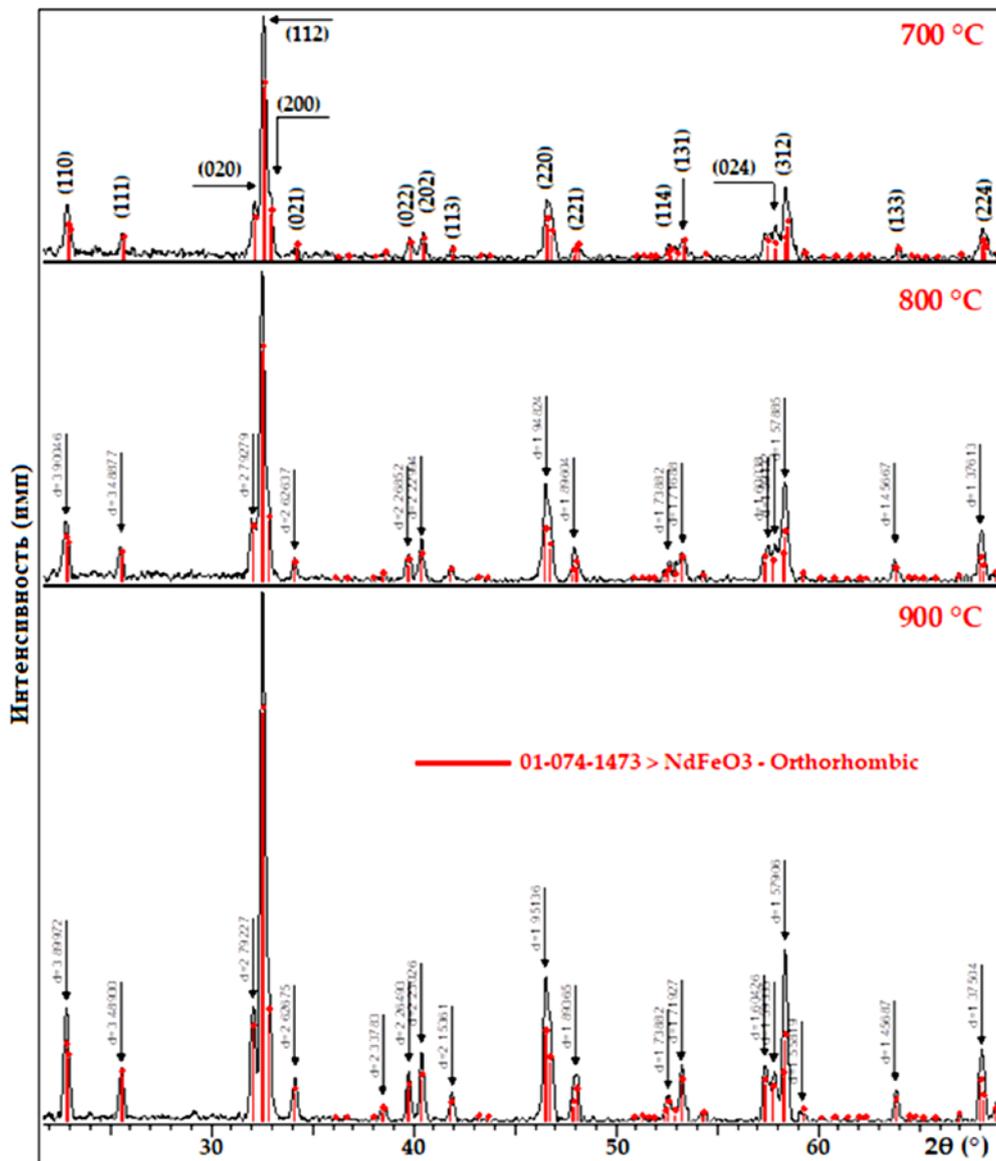
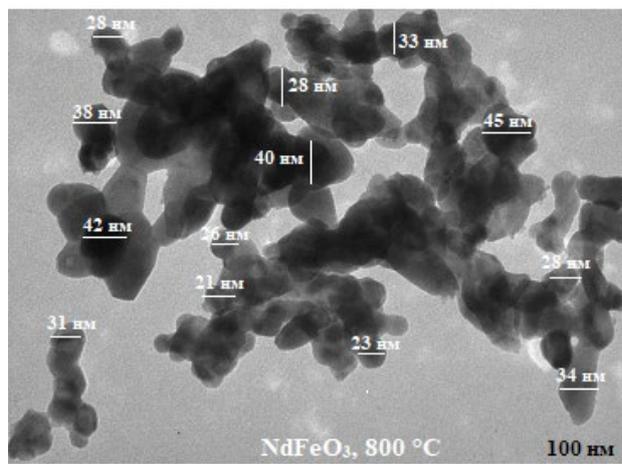


Рис. 1. Дифрактограммы образцов $NdFeO_3$, отожжённых при 700, 800 и 900 °C в течение часа

Таблица 1. Структурные характеристики нанокристаллов NdFeO_3 , отожжённых при 700, 800 и 900 °С в течение часа

NdFeO_3	Высота пика, имп.	Межплоскостные расстояния, Å	D , нм	Параметры ячейки, Å			V , Å ³
				a	b	c	
700 °С	120.29	2.75320	24.41	5.4417	5.6747	7.7727	240.02
800 °С	157.82	2.75322	25.37	5.4522	5.6827	7.7967	241.57
900 °С	269.33	2.75210	29.13	5.4573	5.6963	7.8154	242.95

900 °С) в течение часа, демонстрируют сильное поглощение в ультрафиолетовом (~ 200–400 нм) и видимом диапазоне (~ 400–600 нм) (рис. 3а). Поглощение в ультрафиолетовом диапазоне снижается при увеличении температуры отжига (и увеличении размера кристаллов). В то же время, показатели поглощения в видимом диапазоне для наноматериалов NdFeO_3 , полученных при различных температурах отжига, отличались лишь незначительно, что свидетельствует о стабильности показателей поглощения данных материалов при длине волны $\lambda \sim 750$ нм. Это может объясняться незначительной долей гексагональной фазы ($h\text{-NdFeO}_3$) в NdFeO_3 , пики которой на дифрактограмме практически неотличимы от пиков орторомбической фазы ($o\text{-NdFeO}_3$). Возрастание поглощения гексагональной фазы в видимом диапазоне ранее уже отмечалось для материалов на основе смеси $o\text{-YbFeO}_3/h\text{-YbFeO}_3$ [26]. Присутствие $o\text{-NdFeO}_3$ и $h\text{-NdFeO}_3$ в образцах хорошо согласуется со значениями ширины запрещённой зоны (E_g , эВ) на рис. 3б. Ширина запрещённой зоны для наноматериалов на основе NdFeO_3 варьируется от 2.2 до 2.5 эВ


Рис. 2. ПЭМ изображение наночастиц образца NdFeO_3 , отожжённого при 800 °С в течение часа

(табл. 2), что значительно меньше данного значения для ортоферрита NdFeO_3 , полученного в [26], ($E_g = 4.3$ эВ) и HoFeO_3 ($E_g = 3.39$ эВ), синтезированного методом твёрдофазных реакций в [11]. Значение E_g для наноматериалов на основе NdFeO_3 , полученных в данной работе, соответст-

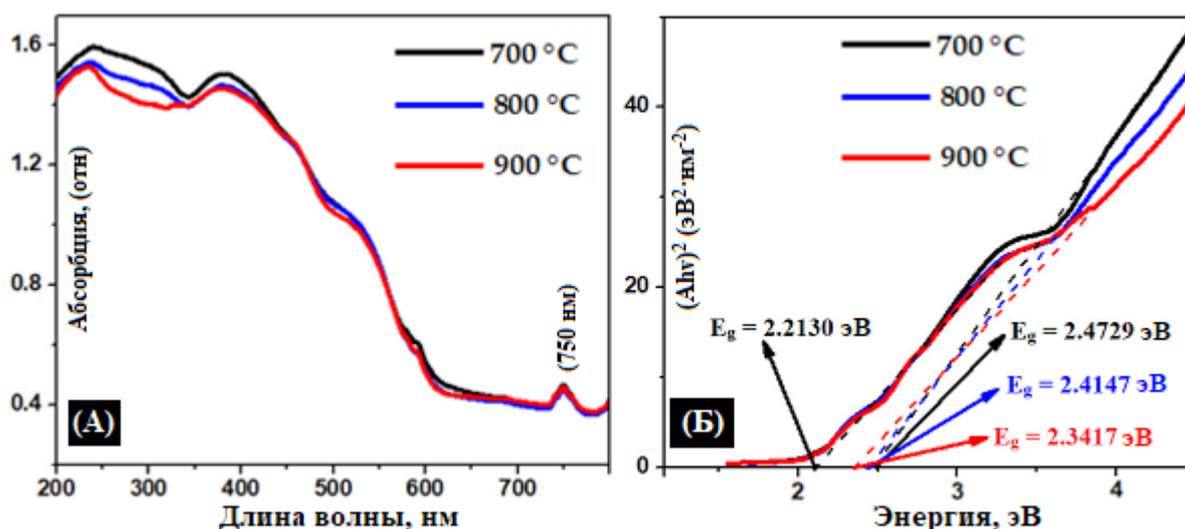

Рис. 3. Спектр оптического поглощения для образцов NdFeO_3 при комнатной температуре (а); зависимость $(Ahv)^2$ в координатах Тауца (б), представленная как функция энергии фотона, для наночастиц образцов NdFeO_3 , отожжённых при 700, 800 и 900 °С в течение часа

Таблица 2. Оптические и магнитные характеристики нанопорошков NdFeO_3 , отожжённых при 700, 800 и 900 °C в течение часа

Samples	E_g , эВ	H_c , Э	M_r , эме/г	M_s , эме/г
NdFeO_3 , 700 °C	2.2130–2.4729	1620.66	$7.7 \cdot 10^{-2}$	0.81
NdFeO_3 , 800 °C	2.2130–2.4147	1453.30	$7.5 \cdot 10^{-2}$	1.01
NdFeO_3 , 900 °C	2.2130–2.3417	590.17	$4.9 \cdot 10^{-2}$	1.47

вует таковому для ортоферрита HoFeO_3 ($E_g = 2.1$ – 2.6 эВ), описанного в нашем предыдущем исследовании [22]. Низкое значение ширины запрещённой зоны для наноматериалов на основе NdFeO_3 делает возможным их использование в качестве фотокатализаторов разложения органических веществ в целях охраны окружающей среды [6–7, 21, 27].

Кривые M – H , полученные при комнатной температуре (300 К) для образцов YFeO_3 , отожжённых при 700, 800 и 900 °C, показывают, что намагниченность насыщения (M_s) продолжает расти в магнитном поле $H = \pm 20000$ Э (магнитное насыщение не достигается). При увеличении температуры отжига коэрцитивная сила (H_c , Э) и остаточная намагниченность (M_r , эме/г) снижаются, в то время как намагниченность насыщения (M_s , эме/г) растёт (табл. 2). При увеличении температуры отжига также увеличивается степень кристалличности материалов, кристаллы становятся более устойчивыми, снижается кристаллическая анизотропия, в результате чего снижается значение M_r и H_c и растёт M_s [28–29]. Высокие значения коэрцитивной силы ($H_c \gg 100$ Э) позволяют отнести полученные на основе ортоферрита NdFeO_3 наноматериалы к классу магнитотвёрдых материалов, которые можно использовать при производстве постоянных магнитов и магнитной плёнки.

4. Заключение

В ходе исследования были получены наноматериалы на основе ортоферрита NdFeO_3 методом совместного осаждения посредством гидролиза катионов ниодима (III) и железа (III) в кипящей воде. Однофазный NdFeO_3 получается путём отжига прекурсора при температурах 700, 800 или 900 °C в течение часа. Размер кристаллов составляет 25–30 нм, размер частиц – 20–40 нм, объём ячейки кристаллической решётки – 240–243 Å³. Синтезированные наноматериалы на основе NdFeO_3 характеризуются низким значением ширины запрещённой зоны (2.2–2.5 эВ) и высокой коэрцитивной силой ($H_c \gg 100$ Э), а также обладают свойствами магнитотвёрдых матери-

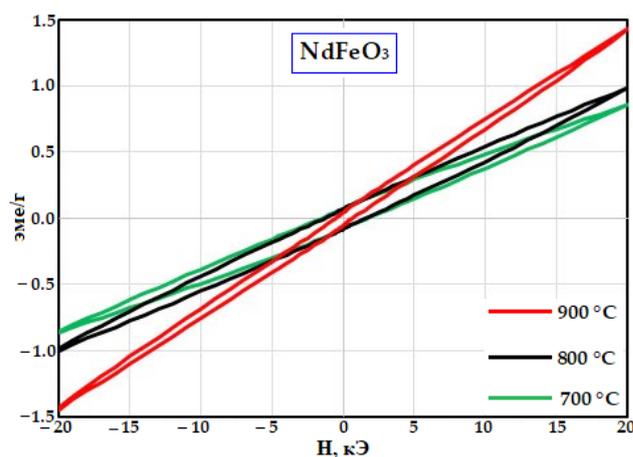


Рис. 4. Магнитные петли гистерезиса (при комнатной температуре) полученных наночастиц NdFeO_3 непосредственно после отжига при температурах 700, 800 и 900 °C в течение часа

алов. Таким образом, их можно использовать в процессе фотокатализа с целью разложения токсичных органических отходов. При этом они легко получаются из редкоземельных магнитов.

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

Список литературы

1. Копейченко Е. И., Миттова И. Я., Перов Н. С., Нгуен А. Т., Миттова В. О., Алехина Ю. А., Фам В. Синтез, состав и магнитные свойства нанопорошков феррита лантана. *Неорганические материалы*. 2021;57(4): 388–392. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21040072>
2. Попков В. И., Тугова Е. А., Бачина А. К., Альмяшева О. В. Формирование нанокристаллов ортоферритов редкоземельных элементов XFeO_3 ($X = \text{Y, La, Gd}$) при термической обработке соосажденных гидроксидов. *Журнал общей химии*.

- 2017;87(11): 1771–1780. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30496370>
3. Wang Z. Q., Lan Y. S., Zeng Z. Y., Chen X. R., Chen Q. F. Magnetic structures and optical properties of rare-earth orthoferrites $R\text{FeO}_3$ ($R = \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}$ and Lu). *Solid State Communications*. 2019;288: 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2018.11.004>
4. Бережная М. В., Перов Н. С., Альмяшева О. В., Миттова В. О., ... Нгуен А. Т. Синтез и магнитные свойства нанокристаллического ортоферрита лантана, допированного барием. *Журнал общей химии*. 2019;89(3): 458–463. <https://doi.org/10.1134/S0044460X19030193>
5. Бережная М. В., Альмяшева О. В., Миттова В. О., Нгуен А. Т., Миттова И. Я. Синтез золь-гель методом и свойства нанокристаллов $\text{Y}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_3$ nanocrystals. *Журнал общей химии*. 2018;88(4): 539–544. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32809637>
6. Кондрашкова И. С., Мартинсон К. Д., Захарова Н. В., Попков В. И. Особенности формирования и фотокаталитическая активность нанокристаллов HoFeO_3 полученный термообработкой продуктов глицин-нитратного горения. *Журнал общей химии*. 2018;88(12): 1943–1950–2471. <https://doi.org/10.1134/S0044460X18120028>
7. Oemar U., Ang P., Hidayat K., Kawi S. Promotional effect of Fe on perovskite $\text{LaNi}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$ catalyst for hydrogen production via steam reforming of toluene. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(14): 5525–5534. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.083>
8. 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>
9. Thu D. T. A., Giang H. T., Manh D. H., Toan N. N. Study on the preparation of gas sensing material LaFeO_3 by sol-gel method using citrate ion as ligand and used in ethanol sensor. *VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology*. 2010;26: 36–43. Available at: <https://js.vnu.edu.vn/NST/article/view/1955>
10. Sasikala C., Durairaj N., Baskaran I., Sathya-seelan B., Henini M. Transition metal titanium (Ti) doped LaFeO_3 nanoparticles for enhanced optical structure and magnetic properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;712: 870–877. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.133>
11. Habib Z., Majid K., Ikram M., Sultan K. Influence of Ni substitution at B-site for Fe^{3+} ions on morphological, optical, and magnetic properties of HoFeO_3 ceramics. *Applied of Physics A*. 2016; 122(5): 550. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0082-z>
12. Zhou Z., Guo L., Yang H., Liu Q., Ye F. Hydrothermal synthesis and magnetic properties of multi-ferroic rare-earth orthoferrites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;583: 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.129>
13. Khorasani-Motlagh M., Noroozifar M., Yousefi M., Jahani Sh. Chemical synthesis and characterization of perovskite NdFeO_3 nanocrystals via a co-precipitation method. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2013; 9(1): 7–14. Available at: http://www.ijnonline.net/article_3874.html
14. Zharvan V., Kamaruddin Y. N., Samnur S., Sujiono E. H. The effect of molar ratio on crystal structure and morphology of $\text{Nd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ ($x = 0.1, 0.2$ and 0.3) oxide alloy material synthesized by solid state reaction method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;202: 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/202/1/012072>
15. Vera Serna P., García Campos C., Sánchez De Jesús F., Bolarín Miró A. M., Juanico Lorán J. A., Longwell J. Mechano-synthesis, crystal structure and magnetic characterization of neodymium orthoferrite. *Materials Research*. 2016;19(2): 389–393. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0214>
16. Luu M. D., Dao N. N., Nguyen D. V., Pham N. C., Vu T. N., Doan T. D. A new perovskite-type NdFeO_3 adsorbent: synthesis, characterization, and As(V) adsorption. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. 2016;7(2): 15–25. Available at: <https://ans.ac.vn/index.php/oms/article/view/498>
17. Tugova E., Yastrebov S., Karpov O., Smith R. NdFeO_3 nanocrystals under glycine nitrate combustion formation. *Journal of Crystals Growth*. 2017;467: 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.03.022>
18. Babu P. R., Babu R. Starch assisted sol-gel synthesis and characterization of NdFeO_3 . *International Journal of ChemTech Research*. 2016;9(4): 364–369.
19. Nguyen A. T., Pham V., Pham L. T., Nguyen T. T. L., Mittova I. Ya., Mittova V. O., Vo N. L., Nguyen T. B. T., Bui X. V., Viryutina E. L. Simple synthesis of NdFeO_3 by the co-precipitation method based on a study of thermal behaviors of Fe (III) and Nd (III) hydroxides. *Crystals*. 2020;10: 219. <https://doi.org/10.3390/cryst10030219>
20. Nguyen A. T., Nguyen N. T., Mittova I. Ya., Perov N. S., Mittova V. O., Hoang T. C. C., Nguyen V. M., Nguyen V. H., Pham V., Bui X. V. Crystal structure, optical and magnetic properties of PrFeO_3 nanoparticles prepared by modified co-precipitation method. *Processing and Application of Ceramics*. 2020;14(4): 355–361. <https://doi.org/10.2298/PAC2004355N>
21. 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 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>

22. Nguyen A. T., Nguyen T. T. L., Bui X. V. Influence of the synthetic conditions on the crystal structure, magnetic and optical properties of holmium orthoferri-rite nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32: 19010–19019. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06415-2>

23. Nguyen A. T., Pham N. T. V., Le T. H., Chau H. D., Mittova V. O., Nguyen T. T. L., Dinh A. D., Hao T. V. N., Mittova I. Ya. Crystal structure and magnetic properties of $\text{LaFe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_3$ nanomaterials prepared via a simple co-precipitation method. *Ceramics International*. 2019;45: 21768–21772. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.178>

24. Nguyen A. T., Pham N. T. V., Nguyen T. T. L., Mittova V. O., Vo Q. M., Berezhnaya M. V., Mittova I. Ya., Do T. H., Chau H. D. Crystal structure and magnetic properties of perovskite $\text{YFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ nanopowders synthesized by co-precipitation method. *Solid State Sciences*. 2019;96: 105922. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.06.011>

25. Nguyen A. T., Pham V., Chau H. D., Mittova V. O., Mittova I. Ya., Kopeychenko E. L., Nguyen T. T. L., Bui X. V., Nguyen T. P. A. Effect of Ni substitution on phase transition, crystal structure and magnetic properties of nanostructured YFeO_3 perovskite. *Journal of Molecule Structure*. 2020;1215: 128293. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128293>

26. Tikhanova S. M., Lebedev L. A., Martinson K. D., Chebanenko M. I., Buryanenko I. V., Semenov V. G., Popkov V. I. Synthesis of novel heterojunction h-Yb- FeO_3 /o-Yb FeO_3 photocatalyst with enhanced fenton-like activity under visible-light. *New Journal of Chemistry*. 2021;45(3):1541–1550. <https://doi.org/10.1039/D0NJ04895J>

27. Mir S. A., Ikram M., Asokan K. Effect of Ni doping on optical, electrical and magnetic properties of Nd orthoferri-rite. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014;534: 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/534/1/012017>

28. Cullity B. D., Graham C. D. *Introduction to magnetic materials*, 2nd ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc., Publication; 2009. <http://doi.org/10.1002/9780470386323>

29. Hien T. D., Tai L. T. *Magnetism and magnetic materials*. Bach Khoa Publishing House. Ha Noi; 2016. (in Vietnamese).

Информация об авторах

Фам Ти Хонг Зуен, магистр х. н., преподаватель Института прикладных технологий, Университет Тху Дау Мот, провинция Биньзыонг, Вьетнам; e-mail: duyenpth@tdmu.edu.vn. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7350-0634>

Нгуен Ань Тьен, к. х. н., доцент, заведующий кафедрой общей и неорганической химии, Педагогический университет Хошимина, Вьетнам; e-mail: tienna@hcmue.edu.vn. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4396-0349>

Поступила в редакцию 08.09.2021; одобрена после рецензирования 10.10.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована онлайн 25.12.2021.

Перевод на русский язык Дымант Юлии Александровны