

УДК 661.864.1:544.22:546.05/06

РАЗМЕР И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКРИСТАЛЛОВ YFeO_3

© 2022 г. И. Я. Миттова¹, Н. С. Перов², Ю. А. Алексина², В. О. Миттова³,
А. Т. Нгуен⁴, Е. И. Копейченко¹, Б. В. Сладкопевцев^{1,*}

¹Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, 394018 Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

³Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко,
ул. Студенческая, 10, Воронеж, 394036 Россия

⁴Ho Chi Minh City University of Education, Ho Chi Minh City, 700000 Vietnam

*e-mail: dp-kmins@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.11.2021 г.

После доработки 30.12.2021 г.

Принята к публикации 10.01.2022 г.

Модифицированным методом Печини синтезированы двухфазные наночастицы YFeO_3 , содержащие орторомбическую и гексагональную фазы (РФА). Размер частиц 6–67 нм, отвечающий нанодиапазону, достигнут с применением этиленгликоля в качестве гелеобразователя (ПЭМ). При исследовании магнитных свойств при 100 и 300 К установлено, что эти нанокристаллы являются слабыми ферромагнетиками и их характеристики зависят от условий синтеза.

Ключевые слова: золь–гель–синтез, модифицированный метод Печини, ортоферрит иттрия, гексаферрит иттрия

DOI: 10.31857/S0002337X22030113

ВВЕДЕНИЕ

Для получения нанокристаллических ортоферритов используется большое разнообразие методик, например, механохимический, гидротермальный синтезы, золь–гель–технология и др. [1]. Свойства наночастиц феррита иттрия, в том числе и магнитные, зависят от их состава и размеров, следовательно, от способов синтеза, определяющих особенности их строения [2–5]. В преодолении склонности наночастиц к быстрой агломерации в растворах показана эффективность метода Печини (цитратный метод) при микроволновой обработке [6] с введением комплексообразователей в раствор прекурсоров. Установлено [7], что в случае синтеза золь–гель–методом наночастиц YFeO_3 при температурах, превышающих 700°C, образуется термодинамически стабильная орторомбическая структура, при более низких температурах YFeO_3 кристаллизуется в гексагональной структуре. В [8] указано, что при температуре отжига нанокристаллов $\approx 750^\circ\text{C}$ обе эти формы существуют, а орторомбическая модификация наблюдается в интервале 800–900°C.

Рассмотренные модификации различаются по целому ряду свойств, в частности, по кристаллографической плотности, которая ниже у гексаго-

нальной модификации. Это определяется различием длин связей металл–кислород в рассматриваемых модификациях [9–11] и, соответственно, меньшей пористостью гексагональной фазы. Поскольку для гексагональных нанокристаллов установлено более низкое значение ширины запрещенной зоны (1.94, 2.30 и 2.43 эВ для нанокристаллов гексагональной модификации, смешанных и орторомбической модификации соответственно), в [8] рассматривается повышенная фотокаталитическая активность в видимом свете гексагональной модификации по сравнению с орторомбической. В [7] такая активность подтверждена в процессах фотокаталитической деградации растворов метилового оранжевого и 4-хлорофенола.

Исследования влияния кристаллической структуры и микроструктуры, особенно распределения зарядовых состояний, не только на ширину запрещенной зоны, но и на хроматические свойства, отражение инфракрасного излучения и радиационные характеристики пигментов YFeO_3 [12] показали, что черные гексагональные пигменты YFeO_3 имеют малый размер частиц и их интенсивное оптическое поглощение в ближнем ИК-диапазоне связано с заметными множественными отражени-

ями, вызванными границей зерен. Коричневые же орторомбические порошковые пигменты YFeO_3 , а также соответствующие пигментированные покрытия обладают хорошими характеристиками отражения в ближнем ИК-диапазоне и способны поддерживать более низкую температуру поверхности объекта. Они могут найти применение в энергосбережении зданий за счет сочетания защиты в ближнем ИК-диапазоне и охлаждения помещений. Весьма интересно применение ферритов, в частности феррита лантана, в качестве сенсоров различных газов, таких как углекислый газ, метанол и др. [13, 14].

Несомненно, такой потенциал имеет и аналог феррита лантана — феррит иттрия, а с учетом возможности управления фазовым составом и свойствами этих соединений посредством допирования различными ионами [15–17] этот потенциал еще более расширяется.

Целью настоящей работы стали разработка методики синтеза наночастиц YFeO_3 модифицированным методом Печини с использованием в качестве комплексообразователя винной кислоты, гелеобразователей — этиленгликоля/глицерина, а также характеристизация и определение магнитных свойств нанопорошков YFeO_3 .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В классическом случае цитратного метода Печини применяется лимонная кислота, однако целесообразно использовать и винную кислоту, способную образовывать прочные хелатные комплексы с металлическими ионами за счет двух гидроксильных групп у соседних атомов углерода [18]. Введение винной кислоты в предварительную стадию взаимодействия исходных компонентов в растворе вместо традиционного использования лимонной кислоты отличает модифицированный синтез Печини [19].

Синтез ортоферрита иттрия осуществляли согласно следующей методике: в дистиллированной воде растворяли $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (“х. ч.”), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (“ч.”) и $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ (“ч. д. а.”). Их массы рассчитывали по формулам исходя из соотношений $n(\text{Fe}^{3+}) : n(\text{Y}^{3+}) : n(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6) = 1 : 1 : 1$ и $1 : 1 : 2$. Гелеобразователями служили глицерин (“ч. д. а.”) и этиленгликоль (“ч. д. а.”). Раствор кипятили в течение 2 ч, после этого развивалась самоподдерживающаяся экзотермическая реакция с участием винной кислоты. Конечный продукт (в виде порошка) отжигали при температуре 800°C в течение 60 мин. Согласно [8], в этих условиях должна преобладать орторомбическая модификация,

однако температура отжига не настолько высока, чтобы исключить образование гексагональной.

Для характеризации параметров синтезированных образцов применяли следующие методы: фазовый состав — рентгенофазовый анализ (РФА; Empyrean, CuK_α -излучение, $\lambda = 0.15406$ нм, идентификацию фаз проводили с использованием базы данных PCDFWIN [20]); размер частиц — просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ; Carl Zeiss LIBRA 120); намагниченность и коэрцитивная сила — магнитометр с вибрирующим образцом (VSM LakeShore, модель 7407). При магнитных измерениях известную навеску порошка (от 10 до 30 мг) запаивали в полиэтиленовые капсулы с размером порядка 4×4 мм и ламинировали, чтобы предотвратить движение частиц порошка в процессе измерений. Капсулу закрепляли на держателе магнитометра с помощью тефлоновой ленты. Магнитное поле напряженностью до 1.3 МА/м в процессе измерений прикладывалось в плоскости капсулы. Измерения при температурах 100 и 300 К проводились в продувном криостате в потоке испаряющегося жидкого азота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно РФА (рис. 1), синтезированные образцы являются двухфазными: содержат орторомбическую и гексагональную модификации феррита иттрия.

По данным ПЭМ, в случае использования глицерина в роли гелеобразователя при соотношениях компонентов $n(\text{Fe}^{3+}) : n(\text{Y}^{3+}) : n(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6) = 1 : 1 : 1$ и $1 : 1 : 2$ размер частиц варьируется в диапазоне от 23 до 190 нм (рис. 2).

Для аналогичных образцов с добавлением этиленгликоля (рис. 3) размер частиц изменяется в диапазоне от 6 до 67 нм. Частицы имеют преимущественно шарообразную форму (рис. 3а), некоторые с выростами (рис. 3б).

Результаты определения фазового состава и размеров частиц YFeO_3 , синтезированных модифицированным методом Печини, представлены в табл. 1.

Наночастицы, синтезированные с добавлением этиленгликоля при $n(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6) = 2$ (табл. 2), удовлетворяют критериям нанодиапазона и не превышают интервал 1–100 нм (образцы 3 и 4 из табл. 1).

Результаты измерения полевых зависимостей намагниченности синтезированных образцов (табл. 3, рис. 4, 5) демонстрируют, что ни на одном из них не достигается магнитное насыщение в поле до 1270 кА/м. Петли гистерезиса свидетельствуют о

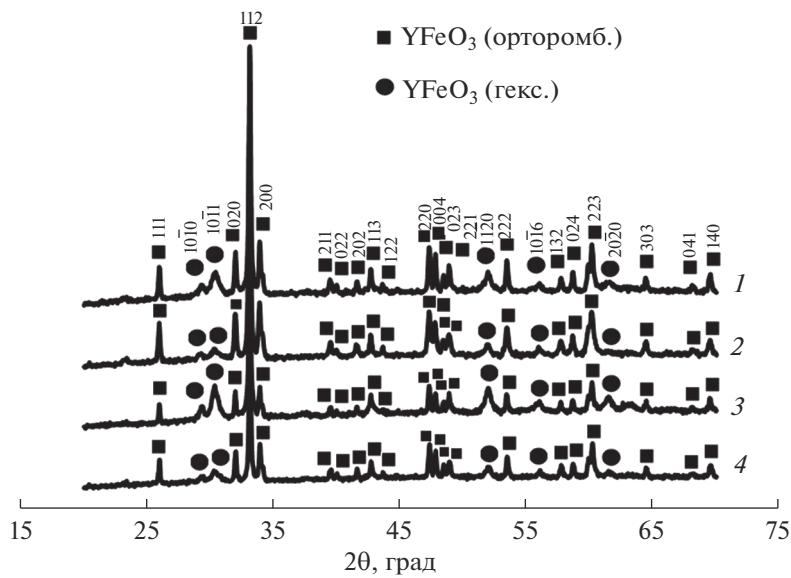


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы синтезированных образцов YFeO_3 : $n(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6) = 1$ (1, 3) и 2 (2, 4); глицерин (1, 2), этиленгликоль (3, 4).

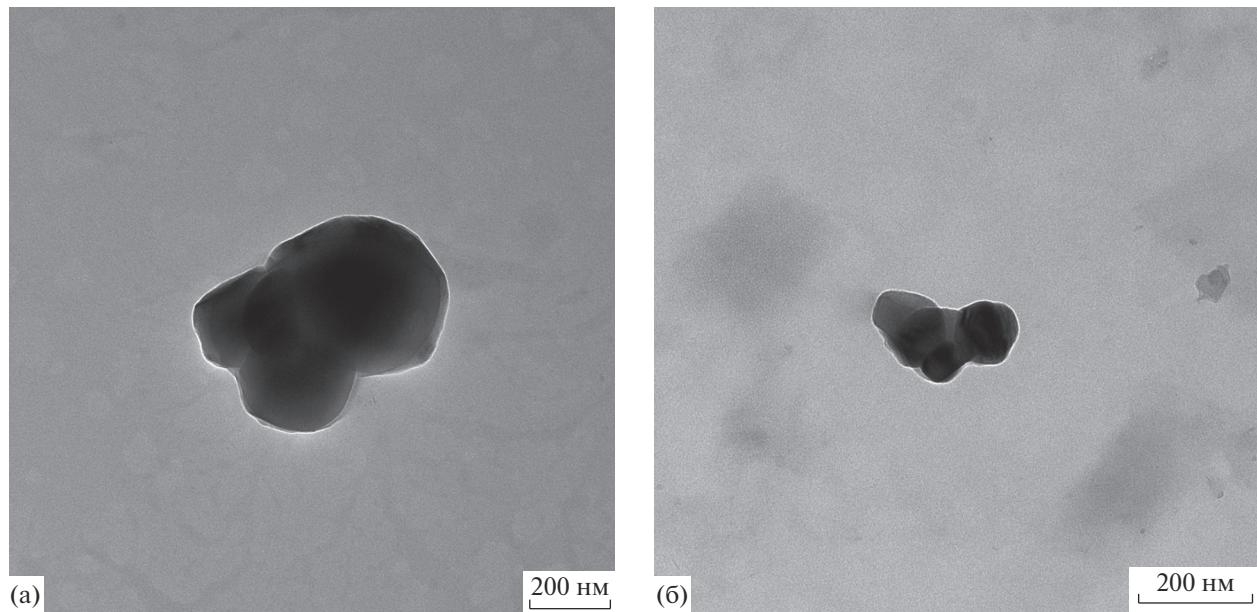


Рис. 2. ПЭМ-изображения порошков YFeO_3 при различном мольном соотношении исходных компонентов, отжиг — 800°C , 60 мин: $n(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6) = 1$ (а) и 2 (б), гелеобразователь — глицерин.

наличии магнитного момента, характерного для феррита иттрия как слабого ферромагнетика [21]. Удельная намагниченность (J) в магнитном поле 1270 кА/м уменьшается с увеличением концентрации винной кислоты для обоих гелеобразователей как при 100 К, так и при комнатной температуре (от 0.873 до 0.314 А м²/кг — $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$; от 0.430 до 0.416 А м²/кг — $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$).

При соотношении $\text{Fe}^{3+} : \text{Y}^{3+} : \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 = 1 : 1 : 2$ (глицерин/этиленгликоль) вид петли гистерезиса при 300 К изменяется по сравнению с соотношением 1 : 1 : 1. При большей концентрации винной кислоты у образцов наблюдается значительное увеличение гистерезиса не только в малых, но и в больших магнитных полях. Оценка коэрцитивности по частным петлям гистерезиса при 300 К дает

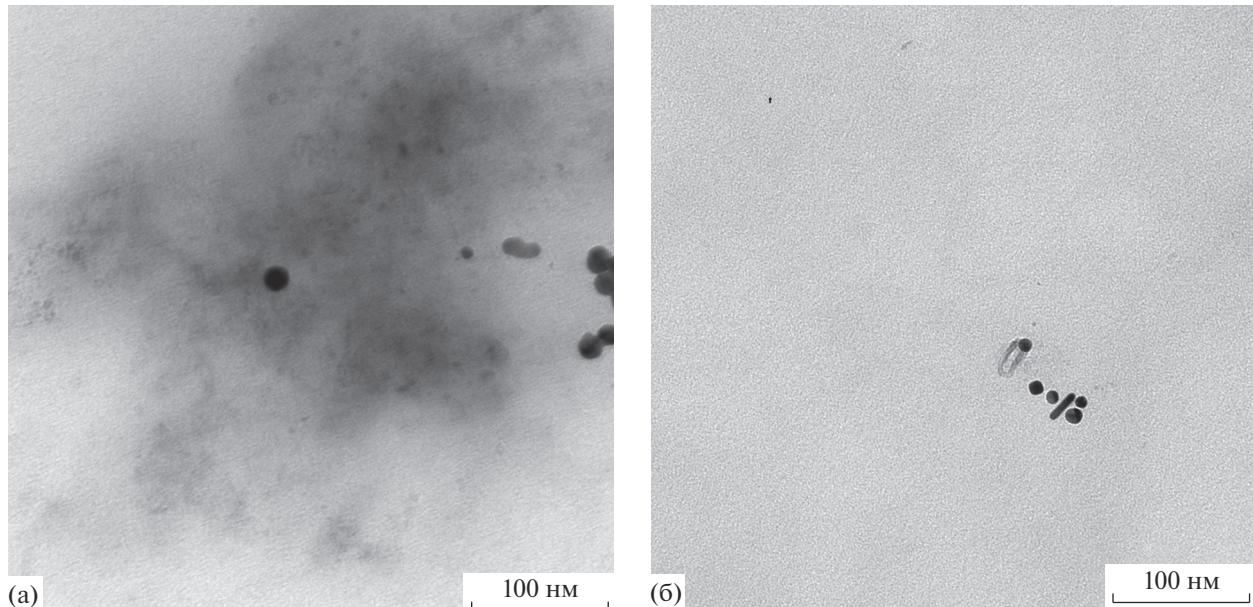


Рис. 3. ПЭМ-изображения порошков YFeO_3 при различном мольном соотношении исходных компонентов, отжиг — 800°C , 60 мин: $n(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6) = 1$ (а) и 2 (б); гелеобразователь — этиленгликоль.

Таблица 1. Результаты исследования нанопорошков YFeO_3 , синтезированных в условиях модифицированного метода Печини (цитратный метод)

Образец	$\text{Y}^{3+} : \text{Fe}^{3+} : \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$	Гелеобразователь	Состав полученных образцов (РФА)	Размер частиц (ПЭМ), нм
1	1 : 1 : 1	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$	o-YFeO_3 h-YFeO_3	23–190
2	1 : 1 : 2	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$	o-YFeO_3 h-YFeO_3	26–180
3	1 : 1 : 1	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	o-YFeO_3 h-YFeO_3	14–67
4	1 : 1 : 2	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	o-YFeO_3 h-YFeO_3	6–25

Примечание. Орторомбическая фаза — 20 пиков, гексагональная — 5 пиков.

$H_c = 115.0$ кА/м и $H_c = 385.1$ кА/м для образцов с глицерином и этиленгликолем соответственно. Петли гистерезиса асимметричны (рис. 4, 5), так как величины прикладываемого поля недостаточно для переворота магнитных моментов подрешеток в образцах (антиферромагнитный тип упорядочения). Вблизи нуля магнитного поля наблюдается скачок намагниченности, который, возможно, связан с разворотом подрешеток. С уменьшением концентрации винной кислоты направление намагниченности изменяется в значительно меньших полях (петля гистерезиса имеет значительно меньшую ширину). При этом в области больших полей наблюдается тенденция к росту намагниченности (см. рис. 5б). Рост наблюдается в меньших полях при замене гелеобразователя на этиленгликоль (рис. 5).

Сравнение с данными [22] для чистой орторомбической фазы YFeO_3 показывает, что наблюдаемая “перетяжка” петли гистерезиса и рост намагниченности в больших полях могут объясняться процес-

Таблица 2. Распределение частиц YFeO_3 по размерам при различном мольном соотношении исходных компонентов, гелеобразователь — этиленгликоль

$\text{Y}^{3+} : \text{Fe}^{3+} : \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$	Размер частиц YFeO_3 , нм	Количество частиц, %
1 : 1 : 1	≤ 15	43
	16–25	38
	26–67	19
1 : 1 : 2	6–10	58
	11–25	42

Таблица 3. Магнитные характеристики нанопорошков YFeO₃ (отжиг при 800°C 60 мин), измеренные при 300 и 100 K

Образец	J (100 K), A m ² /кг	H_c (100 K), кA/м	J (300 K), A m ² /кг	H_c (300 K), кA/м
1	1.241	5.4	0.873	4.6
2	0.612	149.1	0.314	115.0
3	0.542	7.6	0.430	5.5
4	0.473	289.5	0.416	385.1

сом спиновой переориентации — поворотом подрешеток антиферромагнетика под действием внешнего магнитного поля, более выраженным в образцах с более крупными кристаллитами, и зависящим от их формы. Наблюдаемые в нашем эксперименте различия в форме петель гистерезиса имеют схожие причины и могут быть связаны, в том числе, с различием размерного распределения и формы частиц, синтезированных с применением разных гелеобразователей. Разные условия синтеза могут привести к изменению угла скоса подрешеток антиферромагнетика и величины анизотро-

пии, а следовательно, к различию в величинах векторов слабого ферромагнетизма и процессов спиновой переориентации.

Из результатов измерения полевых зависимостей намагниченности при разных температурах (см. табл. 3, рис. 4, 5) следует, что образцы, синтезированные с использованием глицерина и этиленгликоля при концентрации комплексообразователя $n(C_4H_6O_6) = 2$, характеризуются уширением петли в области сильных полей, которое, вероятно, связано с процессом спиновой переориентации. Возможно, также имеется дополнительный вклад в

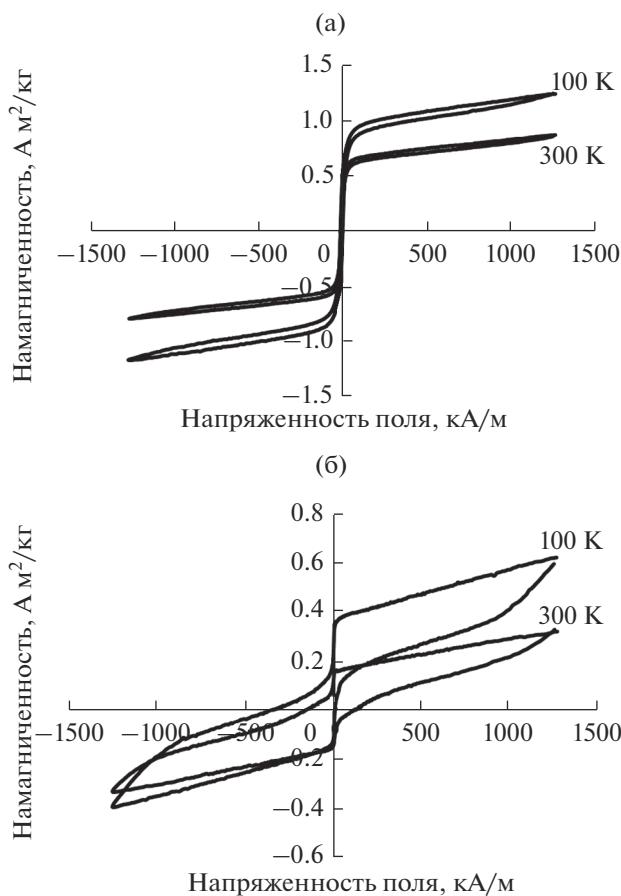


Рис. 4. Петли гистерезиса образцов YFeO₃ (отжиг — 800°C, 60 мин) при 100 и 300 K: $n(C_4H_6O_6) = 1$ (а) и 2 (б); гелеобразователь — глицерин.

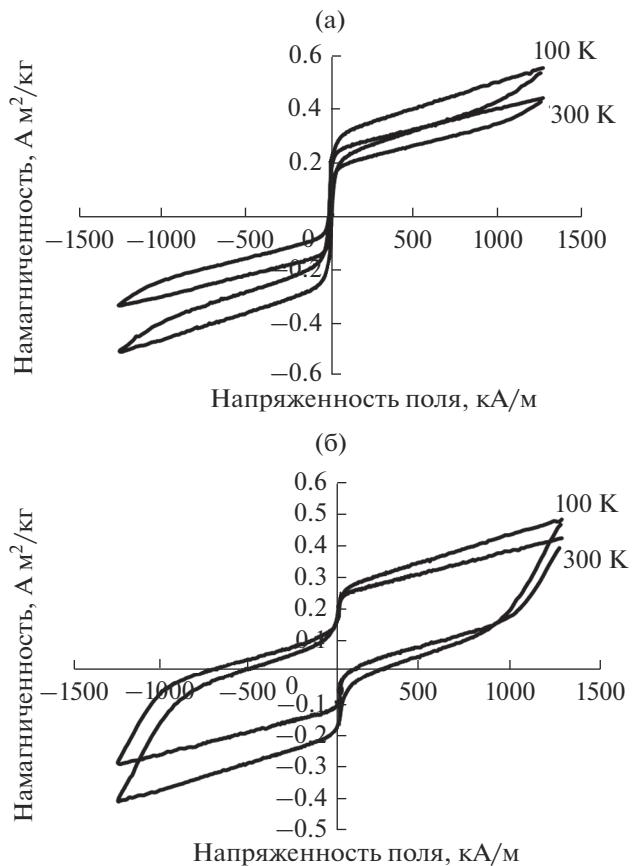


Рис. 5. Петли гистерезиса образцов YFeO₃ (отжиг — 800°C, 60 мин) при 100 и 300 K: $n(C_4H_6O_6) = 1$ (а) и 2 (б); гелеобразователь — этиленгликоль.

раскомпенсацию момента, так как скачок намагниченности более выражен по сравнению с образцами орторомбической модификации YFeO_3 из работы [22]. По аналогии с [23] для наночастиц феррита иттрия, сформированных методом глицин-нитратного горения, можно считать, что быстрое формирование нанокристаллов гексагональной модификации происходит из-за наличия в предшественнике структурно близких предзародышевых образований, в то время как нанокристаллы орторомбического YFeO_3 формируются значительно медленнее путем перекристаллизации гексагональной и аморфной фаз ортоферрита иттрия. Таким образом, предложенный в данной работе режим отжига недостаточен для окончательного формирования термодинамически устойчивой орторомбической модификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы нанокристаллы ортоферрита иттрия, содержащие орторомбическую и гексагональную модификации, в условиях модифицированного метода Печини с использованием гелеобразователей (этиленгликоль/глицерин). Критериям нанодиапазона удовлетворяют образцы, синтезированные с этиленгликолем, размер которых составляет 6–67 нм, причем для соотношения реагентов $\text{Y}^{3+} : \text{Fe}^{3+} : \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 = 1 : 1 : 2$ – до 25 нм.

Все образцы демонстрируют магнитные свойства, характерные для слабых ферромагнетиков. Форма петель гистерезиса свидетельствует о возможной спиновой переориентации магнитных подрешеток во внешнем магнитном поле. Значения характеристик в большей степени зависят от соотношения компонентов при синтезе, чем от природы гелеобразователя.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90048 Аспиранты.

Проведенные исследования выполнены на приборах ЦКПНО ВГУ и кафедры магнетизма МГУ им. М.В. Ломоносова, полученных за счет средств Программы развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mittova I.Ya., Perov N.S., Tomina E.V., Pan'kov V.V., Sladkopevtsev B.V. Multiferroic Nanocrystals and Diluted Magnetic Semiconductors as a Base for Designing Magnetic Materials // Inorg. Mater. 2021. V. 57. № 13. P. 22–48.
<https://doi.org/10.1134/S0020168521130033>
- Duan L., Jiang G.-J., Peng W., Cheng M., Wang X.-J. Influence of Reaction Conditions on the Phase Composition, Particle Size and Magnetic Properties of YFeO_3 Microcrystals Synthesized by Hydrothermal Method // J. Synth. Cryst. 2015. V. 44. № 8. P. 2144–2149.
- Popkov V.I., Almjasheva O.V., Nevedomskiy V.N., Panchuk V.V., Semenov V.G., Gusarov V.V. Effect of Spatial Constraints on the Phase Evolution of YFeO_3 -Based Nanopowders under Heat Treatment of Glycine-Nitrate Combustion Products // Ceram. Int. 2018. V. 44. № 17. P. 20906–20912.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.097>
- Wang M., Wang T., Song S.-H., Ravi M., Liu R.-C., Ji S.-S. Effect of Calcination Temperature on Structural, Magnetic and Optical Properties of Multiferroic YFeO_3 Nanopowders Synthesized by a Low Temperature Solid-State Reaction // Ceram. Int. 2017. V. 43. № 13. P. 10270–10276.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.056>
- Irfan H.L., Jahangeer A., Tokeer A., Reverse M. Synthesis, Characterization, Magnetic and Ferroelectric Properties of YFeO_3 Nanoparticles // Mater. Today: Proc. 2018. V. 5. № 7. Part 2. P. 15303–15310.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.05.010>
- Gharibshahian M., Mirzaee O., Nourbakhsh M.S. Evaluation of Superparamagnetic and Biocompatible Properties of Mesoporous Silica Coated Cobalt Ferrite Nanoparticles Synthesized via Microwave Modified Pechini Method // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 425. P. 48–56.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.116>
- Ismael M., Elhaddad E., Taffa D.H., Wark M. Synthesis of Phase Pure Hexagonal YFeO_3 Perovskite as Efficient Visible Light Active Photocatalyst // Catalysts. 2017. V. 7. P. 326.
<https://doi.org/10.3390/catal7110326>
- Zhang Y., Yang J., Xu J., Gao Q. Controllable Synthesis of Hexagonal and Orthorhombic YFeO_3 and Their Visible-Light Photocatalytic Activity // Mater. Lett. 2012. № 81. P. 1–4.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.080>
- Li J., Singh U.G., Schladt T.D., Stalick J.K., Scott S.L., Seshadri R. Hexagonal $\text{YFe}_{1-x}\text{Pd}_x\text{O}_{3-\delta}$: Nonperovskite Host Compound for Pd^{2+} and Their Catalytic Activity for CO Oxidation // Chem. Mater. 2008. V. 20. № 20. P. 6567–6576.
<https://doi.org/10.1021/cm801534a>
- Patterson A.L. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination // Phys. Rev. 1939. V. 56. P. 978–982.
[https://doi.org/10.1103/PhysRev.56](https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978)
- Du Boulay D., Maslen E.N., Streletsov V.A., Ishizawa N.A. Synchrotron X-ray Study of the Electron Density in YFeO_3 // Acta Crystallogr., Sect B. 1995. V. 51. P. 921–929.
<https://doi.org/10.1107/S0108768195004010>
- Li Y., Ma Y., Liu W., Wang Z., Liu H., Wang X., Wei H., Zeng S., Yi N., Cheng G.J. A Promising Inorganic YFeO_3 Pigments with High Near-Infrared Reflectance and Infrared Emission // Sol. Energy. 2021. V. 226. P. 180–191.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.047>

13. Wang X., Qin H., Sun L., Hu J. CO₂ Sensing Properties and Mechanism of Nanocrystalline LaFeO₃ // *Sens. Actuators, B.* 2013. V. 188. P. 965–971.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.07.100>
14. Qin J., Cui Z., Yang X., Zhu S., Li Z., Liang Y. Synthesis of Three-Dimensionally Ordered Macroporous LaFeO₃ with Enhanced Methanol Gas Sensing Properties // *Sens. Actuators, B.* 2015. V. 209. P. 706–713.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.12.046>
15. Feng C., Ruan S., Li J., Zou B., Luo J., Chen W., Dong W., Wu F. Ethanol Sensing Properties of LaCo_xFe_{1-x}O₃ Nanoparticles: Effects of Calcination Temperature, Co-Doping, and Carbon Nanotube-Treatment // *Sens. Actuators, B.* 2011. V. 155. № 1. P. 232–238.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.11.053>
16. Копейченко Е.И., Мимтова И.Я., Перов Н.С., Нгуен А.Т., Мимтова В.О., Алексина Ю.А., Фам В. Синтез, состав и магнитные свойства нанопорошков феррита лантана, дopedированного кадмием // Неорган. материалы. 2021. Т. 57. № 4. С. 388–392.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X21040072>
17. Nguyen A.T., Pham V., Chau D.H., Mittova V.O., Mittova I.Ya., Kopeychenko E.I., Nguyen L.T.Tr., Bui V.X., Nguyen A.T.P. Effect of Ni Substitution on Phase Transition, Crystal Structure and Magnetic Properties of Nanostructured YFeO₃ Perovskite // *J. Mol. Struct.* 2020. V. 1215. P. 12829.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128293>
18. Asif M., Khan M.A., Atiq S., Alshahrani T., Mahmood Q., Kattan N.A., Manzoor A. Evolution of Structure and Improvement in Dielectric Properties of Praseodymium Substituted YFeO₃ Nanomaterials Synthesized via a Sol-Gel Auto-Combustion Method // *Ceram. Int.* 2021. V. 47. № 5. P. 6663–6674.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.005>
19. Liu X., Gao W.-L. Preparation and Magnetic Properties of NiFe₂O₄ Nanoparticles by Modified Pechini Method // *Mater. Manuf. Processes.* 2012. V. 27. P. 905–909.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2011.610082>
20. *JCPDC PCPDFWIN*: A Windows Retrieval/Display program for Accessing the ICDD PDF-2 Data base, International Centre for Diffraction Data. 1997.
21. Vonsovsky S.V., Turov E.A. Some Problems of Phenomenological Theory of Ferro- and Antiferromagnetism // *J. Appl. Phys.* 1959. V. 30. № 4. P. 9S–18S.
<https://doi.org/10.1063/1.2185984>
22. Popkov V.I., Almjasheva O.V., Semenova A.S., Kellerman D.G., Nevedomskiy V.N., Gusalov V.V. Magnetic Properties of YFeO₃ Nanocrystals Obtained by Different Soft-Chemical Methods // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2017. V. 28. P. 7163–7170.
<https://doi.org/10.1007/s10854-017-6676-1>
23. Попков В.И., Альмаяшева О.В., Панчук В.В., Семенов В.Г., Гусалов В.В. Роль предзародышевых образований в процессах формирования нанокристаллического ортоферрита иттрия // Докл. Академии наук. 2016. Т. 471. № 4. С. 439–443.