

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 542.943:546.682'18'22

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3429>

**Золь-гель синтез, кристаллическая структура и магнитные свойства нанокристаллического ортоферрита празеодима**

Х. В. Буи<sup>1</sup>, А. Т. Нгуен<sup>2✉</sup>

<sup>1</sup>Университет Сайгона, факультет естественных наук,  
700000 Хошимин, Вьетнам

<sup>2</sup>Педагогический университет Хошимина, химический факультет,  
700000 Хошимин, Вьетнам

**Аннотация**

В работе описан процесс получения нанокристаллического ортоферрита празеодима методом золь-гель синтеза с использованием водного раствора метанола в качестве соразтворителя. Однофазные нанокристаллы PrFeO<sub>3</sub> формировались путём отжига прекурсора при температурах 650, 750, 850 и 950 °С в течение 60 минут. Размер кристаллов, объём элементарной ячейки и коэрцитивная сила ( $H_c$ ) нанокристаллического PrFeO<sub>3</sub> возрастают по мере увеличения температуры отжига. Полученный ортоферрит празеодима демонстрирует парамагнитные свойства при  $H_c = 28 - 34$  Ое.

**Ключевые слова:** золь-гель синтез, метанол, ортоферрит празеодима, магнитные свойства

**Для цитирования:** 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>

**For citation:** Bui X. V., Nguyen A. T. Sol-gel synthesis, crystal structure and magnetic properties of nanocrystalline praseodymium orthoferrite. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(2): 196–203. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3429>

✉ Нгуен Ань Тьен, e-mail: [tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn)  
© Х. В. Буи, А. Т. Нгуен, 2021



## 1. Введение

Наноразмерные металлооксидные полупроводники, в частности редкоземельные ортоферриты  $AFeO_3$  ( $A = La, Y, Pr, Sm, Ho$ ), хорошо изучены и находят применение в различных областях, таких как изготовление неорганических пигментов, оптических катализаторов, газовых сенсоров, магнитных материалов и электродов для  $Li^+$ -ионных батарей [1-8]. Свойства подобных материалов зависят не только от размера частиц и морфологии, но и от содержания допанта и способа получения [5-9].

В последнее время для получения наноматериалов на основе ортоферритов  $AFeO_3$  используются методы золь-гель синтеза. Данные методы обладают рядом преимуществ: низкая температура отжига, узкое распределение частиц по размеру, высокая чистота и простота синтеза силнолегированных материалов на основе  $AFeO_3$  [1-3, 10-12]. Основная же проблема связана с выбором органического полимера, используемого для образования геля, что приводит к значительным временным затратам. Ранее [13-14] нами был произведён синтез нанокристаллического ортоферрита  $AFeO_3$  ( $A = Nd$  и  $Ho$ ) со средним размером кристаллов порядка  $< 100$  нм методом совместного осаждения в присутствии этанола посредством гидролиза катионов  $A(III)$  и  $Fe(III)$  в горячей воде ( $T > 95$  °C). В качестве осадителя использовали 5 % раствор  $NH_3$ . Дипольные моменты молекул метанола и этанола практически одинаковы ( $\mu(C_2H_5OH) = 1.66$  Д,  $\mu(CH_3OH) = 1.69$  Д) [15]. При этом они меньше, чем дипольный момент воды ( $\mu(H_2O) = 1.85$  Д) [16]. В то же время вязкость  $CH_3OH$  ( $5.9 \cdot 10^{-4}$  Па·с) ниже вязкости  $C_2H_5OH$  ( $1.2 \cdot 10^{-3}$  Па·с) и значительно ниже, чем у органических полимеров [15]. Следовательно, катионы  $A(III)$  и  $Fe(III)$  хуже взаимодействуют в присутствии  $CH_3OH$ , чем в присутствии  $C_2H_5OH$ , что приводит к снижению размера частиц ортоферрита  $AFeO_3$ , полученного в результате золь-гель синтеза в присутствии метанола.

Настоящая работа посвящена исследованию и описанию синтеза, а также структурных и магнитных свойств нанокристаллического ортоферрита празеодима ( $o-PrFeO_3$ ), полученного методом золь-гель синтеза в присутствии метанола.

## 2. Экспериментальная часть

Для синтеза нанокристаллического ортоферрита празеодима были использованы исходные растворители и химические соединения, приобретённые у следующих производителей:

лей:  $Pr(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  (99.8 %, Merck),  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  (99.6 %, Sigma-Aldrich), абсолютный метанол (99.7 %, плотность 0.792 г/мл), раствор аммиака (Xilong, 85 %, плотность 0.901 г/мл).

Смесь  $Pr(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  с  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  (молярное соотношение 1:1) растворяли в 50 мл растворителя  $H_2O-CH_3OH$  (1:1, V/V). Полученный раствор по каплям добавляли в круглодонную колбу, содержащую 150 мл кипящего соразвителя  $H_2O-CH_3OH$  ( $T \sim 85$  °C). Постепенное добавление смеси  $Pr(III)$  и  $Fe(III)$  в соразвитель при температуре 85 °C ускоряет гидролиз и тем самым позволяет контролировать размер кристаллов ортоферрита  $PrFeO_3$ . Оптимальные условия описаны нами ранее в работах, посвящённых синтезу ортоферритов  $LnFeO_3$  ( $Ln = Y, La, Nd$ ) [17-19]. Полученный золь кипятили ещё в течение 30 минут, а затем охлаждали до температуры  $\sim 30$  °C. При этом он приобретал жёлто-коричневый цвет. Кипячение позволяет сохранить объём растворителя и минимизировать токсичные испарения  $CH_3OH$ . Затем к смеси по каплям добавляли 5 % раствор  $NH_3$  до достижения уровня  $pH \sim 9 \div 10$  (определялся с использованием лакмусовой индикаторной бумаги). Полученную смесь перемешивали в течение 30 минут. После отделения в вакуум-фильтре осадки высушивали при температуре 50 °C в течение 3 часов и измельчали. В результате был получен жёлто-коричневый порошок (прекурсор для получения  $o-PrFeO_3$ ).

Термогравиметрия (ТГА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) проводились с использованием сухого воздуха при скорости нагрева  $10$  К·мин<sup>-1</sup> и максимальной температуре 950 °C в платиновых тиглях. Анализ проводился с использованием синхронного термического анализатора Labsys Evo – TG-DSC 1600 °C (Франция).

Рентгенофазовый анализ (РФА) полученных образцов  $PrFeO_3$  проводился с использованием рентгеновского дифрактометра D8-ADVANCE (Германия) ( $CuK_\alpha$  излучение,  $\lambda = 1.5406$  Å, диапазон углов  $2\theta = 10-75^\circ$ , шаг сканирования  $0.019$  °/с). Размер кристаллов ( $D_{XRD}$ , нм) образцов  $PrFeO_3$  определялся по формуле Шеррера, параметры кристаллической решетки ( $a, b, c, V$ ) рассчитывались способом, описанным в работах [12, 19-20]. Фазовый состав определялся методом Ритвельда в программе Fullprof.

Количественный состав и распределение химических элементов ( $Pr, Fe, O$ ) по поверхности образца исследовалось посредством энергетиче-

сперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) с использованием сканирующего электронного микроскопа FE-SEM S-4800 (Япония). Количественный элементный состав определялся как среднее для значений, полученных в пяти разных точках каждого образца.

Размер кристаллов и морфология полученных образцов  $\text{PrFeO}_3$  определялись посредством просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа Joel JEM-1400 (Япония). Распределение частиц по размеру определялось с помощью программного обеспечения IMAGE J.

Петля гистерезиса и магнитные свойства, в том числе коэрцитивная сила ( $H_c$ , Ое), остаточная намагниченность ( $M_r$ , эме/г) и намагниченность насыщения ( $M_s$ , эме/г), были зарегистрированы с помощью магнитометра MICROSENE EV11 с вибрирующим образцом под действием магнитного поля в диапазоне от  $-21\ 000$  Ое до  $+21\ 000$  Ое.

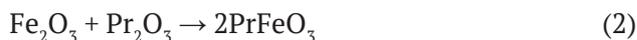
### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены кривые ТГА и ДСК, полученные для прекурсоров нанокристаллического  $\alpha\text{-PrFeO}_3$ . Общая потеря массы при температуре до  $950^\circ\text{C}$  составляет 23.67 %. Это свидетельствует о формировании связей между катионами Pr(III) и Fe(III) и присутствии  $\text{CH}_3^-$  группы в осадке [21]. И действительно, если бы осадок содержал только  $\text{Pr}(\text{OH})_3$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , потеря

массы, рассчитываемая по формуле (1), составила бы 18.07 %.



Потеря массы, вызванная разрушением связей  $\text{M}^{3+}-\text{CH}_3$  ( $\text{M} = \text{Pr}, \text{Fe}$ ), соответствует экзотермическому пику при  $270.56^\circ\text{C}$  на кривой ДСК (рис. 1). Эндотермическим пикам при  $113.37^\circ\text{C}$  и  $358.52^\circ\text{C}$  соответствуют обезвоживание и разложение гидроксидов празеодима (III) и железа (III). Аналогичные результаты были получены в более ранних исследованиях [13, 19] для ортоферритов  $\text{HoFeO}_3$  и  $\text{NdFeO}_3$ . Экзотермическому пику при  $617.31^\circ\text{C}$  соответствует фазообразование ортоферрита  $\text{PrFeO}_3$  из  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , протекающее в соответствии с формулой (2). Такой вывод хорошо согласуется с изменением массы на кривой ТГА (при температуре выше  $\sim 650^\circ\text{C}$  заметных изменений в массе образца не наблюдается). Исходя из результатов ТГА и ДСК, проводился отжиг образца при температурах  $650, 750, 850$  и  $950^\circ\text{C}$  в течение 60 минут с целью определить структурные свойства кристаллов  $\text{PrFeO}_3$  посредством РФА.



На рис. 2 представлены дифрактограммы прекурсора ортоферрита празеодима после отжига при различных температурах в течение 60 минут. В результате была получена орторомбическая фаза  $\text{PrFeO}_3$ . Все наблюдаемые пики

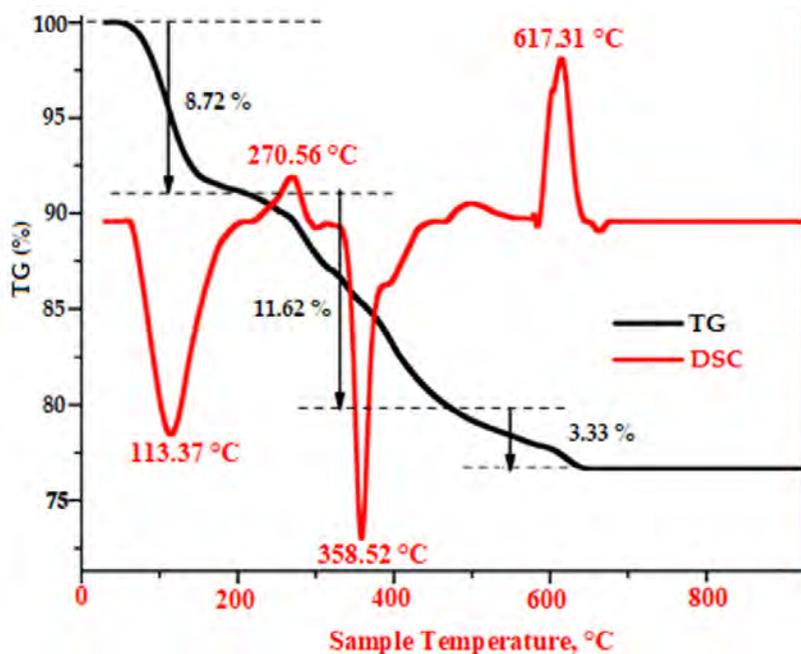
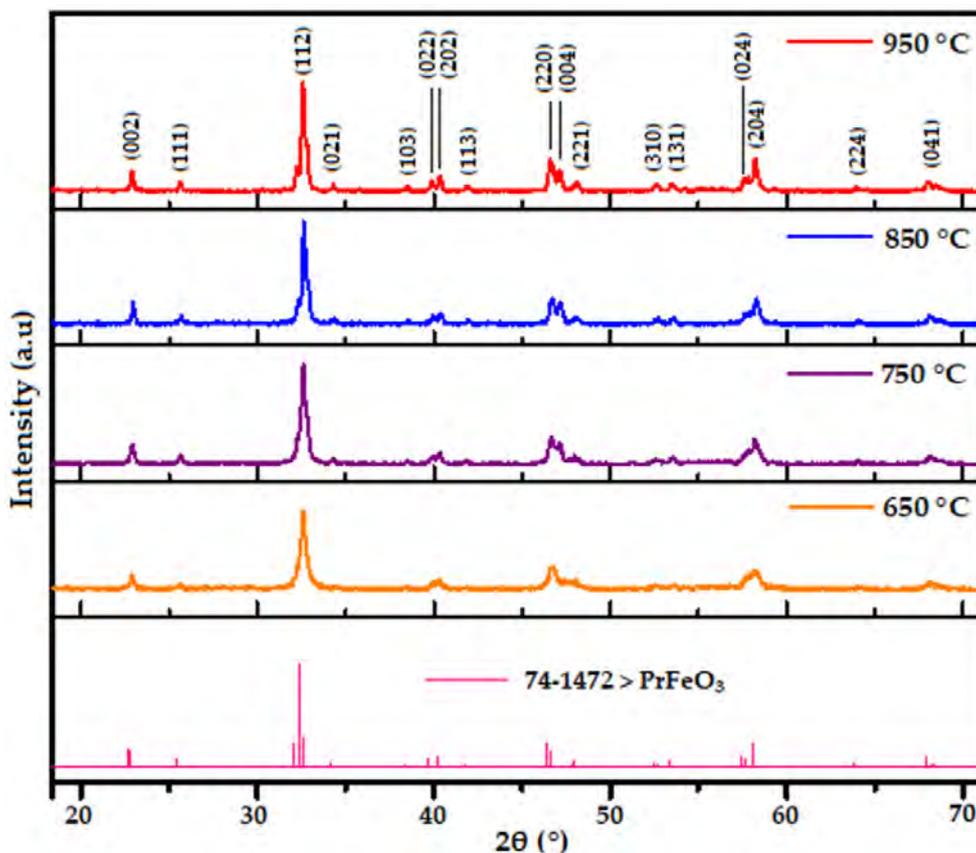


Рис. 1. Кривые ТГА и ДСК для высушенных порошков, синтезированных золь-гель способом



**Рис. 2.** Дифрактограммы нанопорошков PrFeO<sub>3</sub>, отожжённых при 650, 750, 850 и 950 °C в течение 60 минут

соответствуют стандартным пикам PrFeO<sub>3</sub> (согласно базе данных JCPDS: 74–1472). Пиков, соответствующих оксидной фазе Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> или Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не наблюдалось. Степень кристалличности и количество кристаллической фазы образцов PrFeO<sub>3</sub> нелинейно увеличивается по

мере повышения температуры отжига (табл. 1). Кристалличность образца, отожжённого при 750 °C (592.04 отн. ед.), приближается к кристалличности образца, отожжённого при 950 °C (614.66 отн. ед.), но количество кристаллической фазы PrFeO<sub>3</sub> в образце, отожжённом при

**Таблица 1.** Характеристики образцов PrFeO<sub>3</sub>, отожжённых при различных температурах в течение 60 минут

| <i>T</i>                     | 650 °C  | 750 °C  | 850 °C  | 950 °C  |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 2θ, °                        | 32.6092 | 32.5659 | 32.6185 | 32.5584 |
| Высота пика, имп.            | 288.26  | 592.04  | 490.86  | 614.66  |
| Кристаллическая фаза, %      | 68.8    | 93.4    | 80.5    | 89.7    |
| Аморфная фаза, %             | 31.2    | 6.6     | 19.5    | 10.3    |
| FWHM, °                      | 0.1309  | 0.1683  | 0.1122  | 0.1122  |
| Межплоскостные расстояния, Å | 2.74604 | 2.74960 | 2.74529 | 2.75022 |
| <i>D</i> , нм                | 62.5    | 48.6    | 73.0    | 73.0    |
| <i>a</i> , Å                 | 5.4556  | 5.4521  | 5.4509  | 5.4501  |
| <i>b</i> , Å                 | 5.5753  | 5.5840  | 5.6206  | 5.6218  |
| <i>c</i> , Å                 | 7.8113  | 7.7245  | 7.8169  | 7.8145  |
| <i>V</i> , Å <sup>3</sup>    | 237.59  | 235.17  | 239.49  | 239.43  |
| <i>H<sub>c</sub></i> , Ое    | 28.0    | 30.8    | 33.7    | -       |
| <i>M<sub>i</sub></i> , эме/г | 0.22    | 0.13    | 0.76    | -       |
| <i>M<sub>s</sub></i> , эме/г | 0.24    | 1.10    | 0.73    | -       |

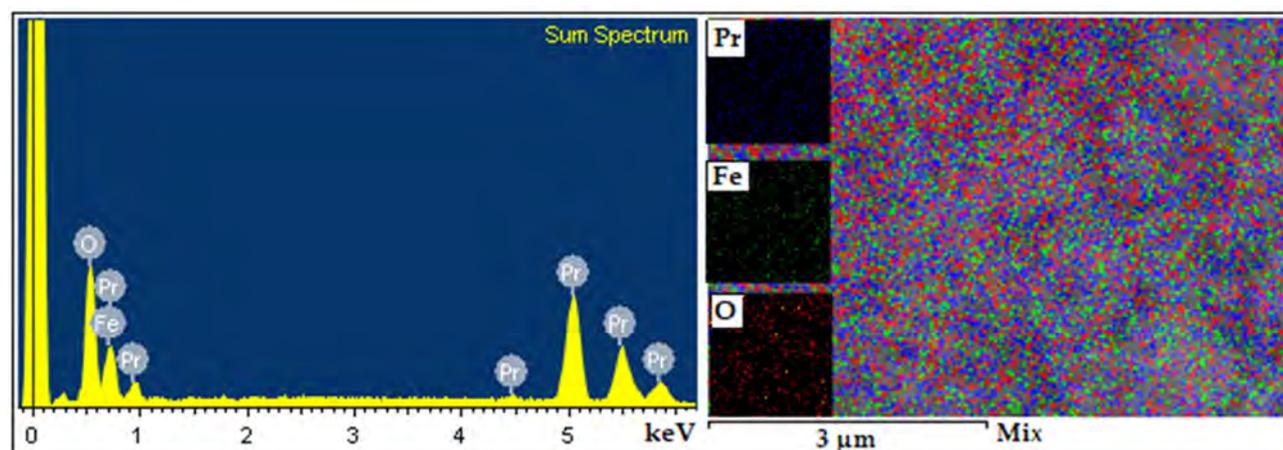
750 °С, значительно превышает её количество в других образцах. Для образца, отожжённого при 750 °С, наблюдалась наибольшая полная ширина на уровне половинной амплитуды (FWHM, °) и, как следствие, наименьший размер кристаллов ( $D_{\text{XRD}} = 48.6$  нм), определённый по формуле Шеррера, и наименьший объём элементарных ячеек ( $V = 235.17 \text{ \AA}^3$ ) (табл. 1). Таким образом, можно предположить, что отжиг при температуре 750 °С в течение 60 минут является оптимальным условием для получения однофазного ортоферрита празеодима (o-PrFeO<sub>3</sub>) методом золь-гель синтеза с использованием водного раствора метанола в качестве соразтворителя.

Анализ ЭДС дифрактограммы образца PrFeO<sub>3</sub>, отожжённого при температуре 750 °С, показал, что пики наблюдались только для празеодима, железа и кислорода. Примесей других элементов обнаружено не было (рис. 3). В табл. 2 приведены средние значения массовых долей и атомных процентов Pr, Fe, O, полученные на основе измерений на пяти разных участках образца. Полученные результаты согласуются с предполагаемым химическим составом (табл. 2).

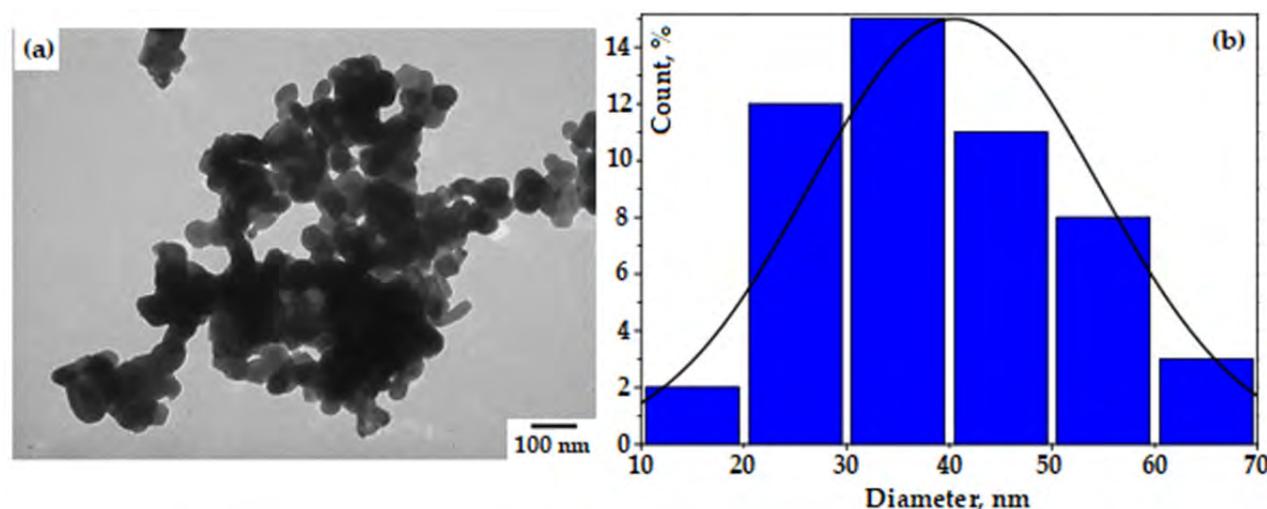
Размер кристаллов и морфология порошка PrFeO<sub>3</sub>, отожжённого при 750 °С, показаны на ПЭМ-изображении (рис. 4а). Полученные кристаллы имеют угловато-сферическую форму, а

**Таблица 2.** EDX-анализ нанопорошков PrFeO<sub>3</sub>, отожжённых при 750 °С

| Pr      |       | Fe      |       | O       |       |
|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| масс. % | ат. % | масс. % | ат. % | масс. % | ат. % |
| 56.39   | 21.02 | 22.35   | 18.28 | 21.36   | 60.70 |



**Рис 3.** ЭДС дифрактограммы образца PrFeO<sub>3</sub>, отожжённого при 750 °С



**Рис. 4.** (а) ПЭМ-изображение образца PrFeO<sub>3</sub>, отожжённого при 750 °С, и (б) распределение частиц по размеру

их размер составляет 20–60 нм (рис. 4б). Средний размер кристаллов вычислялся в программе IMAGE J и составил 46.28 нм. Полученные результаты практически совпадают с результатами измерений по формуле Шеррера ( $D_{\text{XRD}} = 48.6$  нм) (табл. 1).

Зависимость намагниченности нанокристаллов  $\text{PrFeO}_3$  от напряжённости магнитного поля при температуре 300 К показана на рис. 5. Коэрцитивная сила ( $H_c = 20.8 \div 30.7$  Ое) и остаточная намагниченность ( $M_r = 0.13 \div 0.76$  эме/г) (табл. 1) всех трёх исследованных образцов  $\text{PrFeO}_3$  значительно ниже, чем у  $\text{PrFeO}_3$ , полученных методом совместного осаждения, описанным Sudandararaj T. S. A. et. al. [22] ( $H_c = 505.45$  Ое,  $M_r = 27.63$  эме/г). Малые значения  $H_c$  и  $M_r$  могут быть связаны с гомогенностью формы и размера нанокристаллов  $\text{PrFeO}_3$ , имеющих чёткие границы (рис. 4). В то же время на ПЭМ-изображении соответствующего образца  $\text{PrFeO}_3$  в [22] границы размыты, и наблюдается сильная агрегация, что приводит к формированию агломерации частиц, несмотря на то, что их размер составляет 36.0 нм (согласно расчётам в Image J).

Стоит особо отметить, что магнитные свойства нанокристаллического  $\text{PrFeO}_3$  не закономерно меняются по мере изменения температуры отжига (табл. 1). Образец  $\text{PrFeO}_3$ , отожжённый при температуре 750 °С, имеет наименьшую  $M_r$  (0.13 эме/г) и наибольшую  $M_s$  (1.10 эме/г). Это можно объяснить наибольшей степенью кристалличности и количеством кристаллической

фазы образца  $\text{PrFeO}_3$ , отожжённого при 750 °С (табл. 1), что приводит к снижению магнитокристаллической анизотропии, росту  $M_s$  и снижению  $M_r$  [23–24].

Таким образом при низких  $H_c$ ,  $M_r$  и высокой  $M_s$ , полученные нанокристаллы  $\text{PrFeO}_3$  представляют собой магнитомягкий материал, который может применяться в качестве трансформаторов, электромагнитов и проводников [24].

#### 4. Заключение

В работе описан процесс получения нанокристаллического ортоферрита празеодима ( $\text{o-PrFeO}_3$ ) методом золь-гель синтеза с использованием водного раствора метанола в качестве соразтворителя. Нанокристаллы  $\text{PrFeO}_3$  получали путём отжига прекурсора при различных температурах (650, 750, 850 и 950 °С) в течение часа. Размер кристаллов  $\text{PrFeO}_3$  варьируется в диапазоне 45–70 нм (РФА, ПЭМ). Образец  $\text{PrFeO}_3$ , отожжённый при температуре 750 °С, имеет наибольшую кристалличность (592.04 отн.ед.) и содержание кристаллической фазы (93.4 %) (РФА) при наименьшем размере частиц (46.28 нм, ПЭМ). Полученные нанокристаллы  $\text{PrFeO}_3$  представляют собой магнитомягкий материал с малой коэрцитивной силой и остаточной намагниченностью и высокой намагниченностью насыщения.

#### Вклад авторов

Авторы внесли одинаковый вклад в работу, представленную в статье.

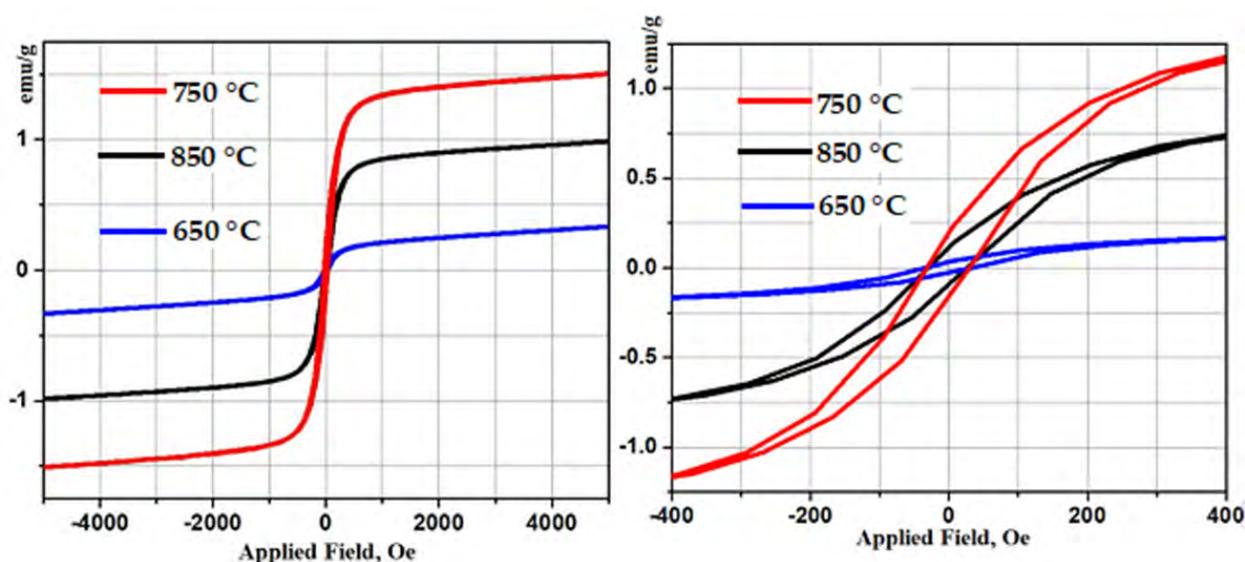


Рис. 5. Зависимость намагниченности нанокристаллов  $\text{PrFeO}_3$ , отожжённых при 650, 750 и 850 °С в течение часа, от напряжённости магнитного поля

**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. Opuchovic O., Kreiza G., Senvaitiene J., Kazlauskas K., Beganskiene A., Kareiva A. Sol-gel synthesis, characterization and application of selected sub-microsized lanthanide (Ce, Pr, Nd, Tb) ferrites. *Dyes and Pigments*. 2015;118: 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2015.03.017>
2. Luxova J., Sulcova P., Trojan M. Influence of firing temperature on the color properties orthoferrite PrFeO<sub>3</sub>. *Thermochimica Acta*. 2014;579: 80–85, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2014.01.017>
3. Kondrashkova I. S., Martinson K. D., Zakharova N. V., Popkov V. I. Synthesis of nanocrystalline HoFeO<sub>3</sub> photocatalyst via heat treatment of products of glycine-nitrate combustion, *Russian Journal of General Chemistry*. 2018;88(12): 2465–2471. <https://doi.org/10.1134/S1070363218120022>
4. Fergus J. W. Perovskite oxides for semiconductor-based gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007;123(2): 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.10.051>
5. Oemar U., Ang P., Hidajat K., Kawi S. Promotional effect of Fe on perovskite LaNi<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub> catalyst for hydrogen production via steam reforming of toluene. *International Journal Hydrogen Energy*. 2013;38(14): 5525–5534. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.083>
6. Mir F. A., Sharma S., Kumar R. Magnetizations and magneto-transport properties of Ni-doped PrFeO<sub>3</sub> thin films. *Chinese Physics B*. 2014;23(4): 048101. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/23/4/048101>
7. Zhang L., Zhang X., Tian G., Zhang Q., Knapp M., Ehrenberg H., Chen G., Shen Z., Yang G., Gu L. Lithium lanthanum titanate perovskite as an anode for lithium ion batteries. *Nature communications*. 2020;11(1): 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17233-1>
8. Liu J., Sheha E., El-Dek S. I., Goonetilleke D., Harguindeguy M., Sharma N. SmFeO<sub>3</sub> and Bi-doped SmFeO<sub>3</sub> perovskites as an alternative class of electrodes in lithium-ion batteries. *CrystEngComm*. 2018;20(40): 6165–6172. <https://doi.org/10.1039/c8ce00780b>
9. Chen Ch., Jang P. W., Kim J. S. Ferroelectric and magnetic properties of PrFeO<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> and PrFeO<sub>3</sub>-BiFeO<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> thin films. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2002;41(11B): 6777. <https://doi.org/10.1143/JJAP.41.6777>
10. Pekinchak O., Vasylechko L., Lutsyuk I., Vakhula Ya., Prots Yu., Carrillo-Cabrela W. Sol-gel-prepared nanoparticles of mixed praseodymium cobaltites-ferrites. *Nanoscale Research Letters*. 2016;11: 75. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1295-y>
11. Peisong T., Xinyu X., Haifeng Ch., Chunyan L., Yangbin D. Synthesis of nanoparticulate PrFeO<sub>3</sub> by sol-gel method and its visible-light photocatalytic activity. *Ferroelectrics*. 2019;546: 181–187. <https://doi.org/10.1080/00150193.2019.1592470>
12. Tijare S. N., Bakardjieva S., Subrt J., Joshi M. V., Rayalu S. S., Hishita S., Labhsetwar N. Synthesis and visible light photocatalytic activity of nanocrystalline PrFeO<sub>3</sub> perovskite for hydrogen generation in ethanol-water system. *Journal of Chemical Sciences*. 2014;126(2): 517–525. <https://doi.org/10.1007/s12039-014-0596-x>
13. Nguyen T. A., Nguyen L. T. Tr., Bui V. X., Nguyen D. H. T., Lieu H. D., Le L. M. T., Pham V. Optical and magnetic properties of HoFeO<sub>3</sub> 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>
14. Nguyen A. T., Nguyen V. Y., Mittova I. Ya., Mittova V. O., Viryutina E. L., Hoang C. Ch. T., Nguyen Tr. L. T., Bui X. V., Do T. H. Synthesis and magnetic properties of PrFeO<sub>3</sub> by the co-precipitation method using ethanol. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2020;11(4): 468–473. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2020-11-4-468-473>
15. Housecroft C. E., Sharpe A. G. *Inorganic Chemistry, 2nd edition*. Pearson: Prentice Hall; 2005.
16. Klein D. *Organic Chemistry, 2nd edition*. Wiley; 2016. chapter 13.
17. Nguyen A. T., Mittova I. Ya., Almjasheva O. V., Kirillova S. A., Gusarov V. V. Influence of the preparation condition on the size and morphology of nanocrystalline lanthanum orthoferrite. *Glass Physics and Chemistry*. 2008;34(6): 756–761. <https://doi.org/10.1134/S1087659608060138>
18. Nguyen A. T., Mittova I. Ya., Almjasheva O. V. Influence of the synthesis condition on the particle size and morphology of yttrium orthoferrite obtained. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009;82(11): 1915–1918. <https://doi.org/10.1134/S1070427209110020>
19. Nguyen T. A., Pham V., Pham Th. L., Nguyen L. T. Tr., Mittova I. Ya., Mittova V. O., Vo L. N., Nguyen B. T. T., Bui V. X., Viryutina E. L. Simple synthesis of NdFeO<sub>3</sub> by the so-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. Abdellahi M., Abhari A. Sh., Bahmanpour M. Preparation and characterization of orthoferrite PrFeO<sub>3</sub> nanoceramic. *Ceramics International*. 2016;42(4): 4637–4641. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.12.027>

21. Brinker C. J., Scherer G. W. (eds.) *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*. I Boston: Academic Press; 1990. 908 p.

22. Sudandararaj T. A. S., Kumar G. S., Dhivya M., Eithiraj R. D., Banu I. B. S. Spin reorientation transition in nanoscale multiferroic  $\text{PrFeO}_3$  and its band structure calculation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;817: 152747. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152747>

23. Nada F. A., Ahmed G., Ekram H. E.-A. *Perovskite nanomaterials: Synthesis, characterization, and applications, 1<sup>st</sup> ed.* / Likun Pan, Guang Zhu (eds.). London: InTechOpen; 2016. Chapter 4, pp. 107–151. <https://doi.org/10.5772/61280>

24. Cullity B. D., Graham C. D. *Introduction to magnetic materials, 2<sup>nd</sup> ed.* Canada: John Wiley & Sons, Inc.,

Publication; 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470386323>

### Информация об авторах

Хуан Вонг Буи, к. х. н., преподаватель факультета естественных наук университета Сайгона, Хошимин, Вьетнам; e-mail: [bxvuong@sgu.edu.vn](mailto:bxvuong@sgu.edu.vn). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3757-1099>.

Ань Тьен Нгуен, к. х. н., заведующий кафедрой общей и неорганической химии педагогического университета Хошимина, Вьетнам; e-mail: [tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn). ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-4396-0349>.

Поступила в редакцию 13.04.2021; одобрена после рецензирования 30.04.2021; принята к публикации 15.05.2021; опубликована онлайн 25.06.2021.

Перевод на русский язык Дымант Юлии Александровны