

УДК 544.778.4

DOI 10.21685/2072-3040-2019-4-10

Н. И. Цидаева, А. Т. Накусов,
С. А. Хайманов, А. К. Хубаев, И. В. Силаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО СИНТЕЗА НА СВОЙСТВА МИКРО/НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ФЕРРИТА-ГРАНАТА САМАРИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. В последнее десятилетие вызывают интерес исследователей необычные физические и химические свойства наноматериалов. Возможность управления магнитными характеристиками материалов за счет изменения размеров, формы, состава и строения наночастиц является, несомненно, актуальной для развития современной наноэлектроники. Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния температуры гидротермального синтеза на магнитные свойства наноструктурированных порошков феррита-граната самария.

Материалы и методы. Химический и фазовый состав синтезированных порошков феррита-граната самария исследовался методом рентгенофазового анализа на дифрактометре фирмы Bruker D8 Advance, снабженном вертикальным гониометром в интервале углов $\theta/2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ ($\text{CuK}_\alpha = 1,54 \text{ \AA}$). Спектры рамановского рассеяния при комнатной температуре регистрировали с помощью рамановского спектрометра Jobin-Yvon (LabRAM ARAMIS), оснащенного ПЗС-детектором и диодным полупроводниковым лазером ($\lambda = 785 \text{ nm}$) мощностью 35 mW в качестве источника возбуждения. Магнитные свойства синтезированных образцов исследовались при комнатной температуре на магнетометре Quantum Design Physical Property Measurement System (Quantum Design PPMS).

Результаты. Легким гидротермальным методом при различных температурах синтезированы наноструктурированные порошки феррита-граната самария. Исследована зависимость магнитных характеристик от величины внешнего магнитного поля с учетом температуры синтеза порошков. Установлено, что образцы, синтезированные при разных температурах, в магнитном поле демонстрируют различное поведение: парамагнитное, слабое ферромагнитное и суперпарамагнитное. Проведено сравнение с экспериментальными данными других авторов и показано хорошее согласие с ними. Выдвинуто предположение о механизмах магнитной активности порошков феррита-граната самария.

Выводы. Изменением температуры проведения мягкого гидротермального синтеза можно успешно управлять магнитными свойствами ферритов самария с различной морфологией частиц.

© Цидаева Н. И., Накусов А. Т., Хайманов С. А., Хубаев А. К., Силаев И. В., 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Ключевые слова: наноструктурированные порошки, редкоземельные ферриты-гранаты, ортоферриты, гидротермальный синтез.

*N. I. Tsidaeva, A. T. Nakusov,
S. A. Khaymanov, A. K. Khubaev, I. V. Silaev*

STUDY OF THE EFFECT OF TEMPERATURE FOR HYDROTHERMAL SYNTHESIS ON THE PROPERTIES OF MICRO/NANOSTRUCTURED SAMARIUM GARNET FERRITE POWDERS

Abstract.

Background. The increased interest of researchers in nanoobjects is caused by the detection of unusual physical and chemical properties in them, which is related to the demonstration of so-called "quantum dimensional effects". A special place among them is occupied by magnetic properties, in which differences between massive (bulk) material and nanomaterials are most clearly evident. By changing the size, shape, composition and structure of the nanoparticles, it is possible to control the magnetic characteristics of the materials based on them within certain limits, which makes the presented research results undoubtedly relevant. The aim of this work is an experimental study of the effect of hydrothermal synthesis temperature on the magnetic properties of nanostructured samarium garnet ferrite powders.

Materials and methods. The chemical and phase composition of synthesized samarium garnet ferrite powders was examined by X-ray phase analysis on a Bruker D8 Advance diffractometer. The experiment was conducted with a vertical copper goniometer with a wavelength of $\text{CuK}_\alpha = 1,54 \text{ \AA}$ at angles $\theta/2\theta = 10^\circ - 90^\circ$. Ranges of the Raman dispersion at the room temperature registered by the Raman spectrometer of Jobin-Yvon (LabRAM ARAMIS) equipped with the CCD detector and the diode junction laser ($\lambda = 785 \text{ nm}$) 35 mW as an excitation source. The magnetic properties of the synthesized samples were examined at room temperature on a Quantum Design Physical Property Measurement System (QuantumDesign PPMS) magnetometer.

Results. Nanostructured samarium garnet ferrite powders were synthesized by a light hydrothermal method at various temperatures. The dependence of magnetic characteristics on the value of external magnetic field taking into account the temperature of powder synthesis has been investigated. Comparison was made with the experimental data of other authors and good agreement with them was demonstrated. The mechanisms of magnetic activity of samarium garnet ferrite powders have been suggested.

Conclusions. Change of temperature of soft hydrothermal synthesis can be successfully controlled by magnetic properties of samarium ferrites with different morphology of particles.

Keywords: nanostructured powders, rare earth garnet ferrite, orthoferrites, hydrothermal synthesis.

Введение

Металлооксиды вызывают в последние годы большой интерес исследователей [1, 2]. Особенно ярко этот интерес проявляется к металлооксидам, основанным на редкоземельных элементах, вследствие их уникальных свойств и широкого применения в микроволновых устройствах, магнитных средах, лазерах, фосфоресцирующих материалах, электрохимических устрой-

ствах, перестраиваемых фильтрах и цифровой памяти на магнитно-пузырьковых доменах [3–10]. Известно, что свойства металлооксидных наноматериалов очень чувствительны к их форме. Особенно, что касается ферритовых наноматериалов, контроль формы выгоден для улучшения характеристик поверхности и локального обменного взаимодействия [11]. В нашей предыдущей работе было установлено, что морфология ферритов кобальта хорошо управляема легированием редкоземельными ионами Pr^{3+} и изменение морфологии сильно влияет на структуру поверхности и физические свойства ферритов кобальта, легированных Pr^{3+} [11]. При использовании гидротермального метода Юанем и соавт. [10] были подготовлены различные формы кристаллов REFeO_3 ($\text{RE} = \text{La}, \text{Pr}, \text{Sm}, \text{Dy}, \text{Er}$ и Y) и обсуждены их различные свойства.

Редкоземельные ферриты самария, включая $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и SmFeO_3 , как серия важных функциональных материалов, демонстрируют потенциальные применения в катализаторах, датчиках температуры, микроволновых поглотителях и хранилищах высокой плотности [12–14]. Были разработаны различные методы приготовления субмикронных или нанокристаллических ферритов самария, такие как обычные твердотельные реакции, соосаждение, золь-гель и гидротермальные методы [15, 16]. Однако твердофазная реакция обычно требует высокой температуры реакции, длительного времени спекания и стадий измельчения. Золь-гель метод часто требует большого количества растворителя и длительной технологии обработки микроэмульсии [17]. Среди них в последние годы гидротермальный метод обычно рассматривается как простая в применении и экологически чистая технология приготовления ферритовых наноматериалов [18].

Так называемый легкий гидротермальный метод был использован нами для синтеза редкоземельных самариевых ферритов. Основная цель нашей работы состояла в выявлении влияния температуры проведения синтеза на морфологию, микроструктуру и магнитные свойства синтезированных ферритов.

1. Материал и методика

Все образцы в этом эксперименте были синтезированы нонагидратом нитрата железа (III) $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$, гексагидратом нитрата самария (III) $[\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ и NaOH . Все химические вещества, приобретенные у Sinopharm Chemical Company Reagent Company Ltd., Шанхай, Китай, имели аналитическую оценку без какой-либо дальнейшей обработки. На протяжении экспериментов использовалась деионизированная вода.

Азотнокислые соли $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, растворенные в 70 мл дистиллированной воды с добавленной щелочью NaOH в количестве 10 г на 50 мл, при помощи магнитной мешалки размешивали в течение 1 ч (при 6000 об/мин). Окончательная структура ферритов-гранатов формировалась после температурной обработки раствора ($t = 12$ ч, $T = 150 \dots 240$ °C), находящегося в сосуде из нержавеющей стали с тефлоновым вкладышем. Уменьшение щелочности достигалось путем промывки синтезированного порошка деионизированной водой до $\text{pH} = 7$. Осаждение полученного феррита-граната проводилось путем центрифугирования (3–5 мин) с добавлением этанола (25–30 мл). Просушка образца ($t = 10$ ч, $T = 80$ °C) позволила избавиться от остаточных продуктов реакции.

2. Результаты

Химический и фазовый состав синтезированных порошков феррита-граната самария исследовался методом рентгенофазового анализа на дифрактометре фирмы Bruker D8 Advance, снабженном вертикальным гониометром в интервале углов $\theta/2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ ($\text{CuK}\alpha = 1, 54 \text{ \AA}$). Спектры рамановского рассеяния при комнатной температуре регистрировали с помощью рамановского спектрометра Jobin-Yvon (LabRAM ARAMIS), оснащенного ПЗС-детектором и диодным полупроводниковым лазером ($\lambda = 785 \text{ nm}$) мощностью 35 mW в качестве источника возбуждения.

Магнитные свойства синтезированных образцов исследовались при комнатной температуре на магнетометре Quantum Design Physical Property Measurement System (QuantumDesign PPMS).

Гидротермальная кристаллизация является многофакторным процессом. Факторами, влияющими на формирование продуктов, являются, например, щелочность, время реакции и температура кристаллизации. Рентгенограммы $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ показаны на рис. 1.

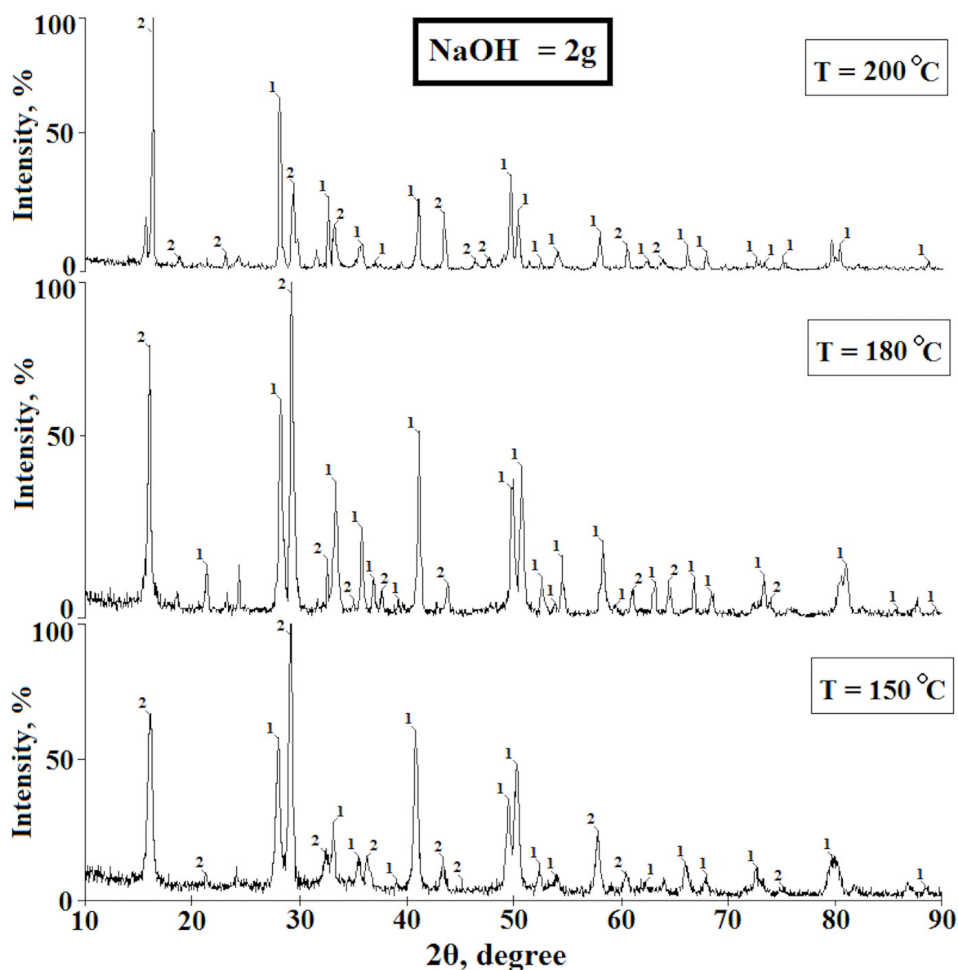


Рис. 1. Дифрактограммы порошков $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

На основании порошкового рентгенографического анализа можно заключить, что кристаллы хорошо кристаллизуются без обнаружения примесной фазы. Они проиндексированы в кубической пространственной группе Ia3d. Уточненный параметр решетки составляет 1,25401 нм. Определение кристаллической структуры осуществлялось при помощи соотношения интенсивностей и углов пиков на дифрактограммах. Для подтверждения полученных результатов использовались базы данных, а также результаты авторов [17, 19, 20]. Проведя анализ дифрактограмм, можно отметить следующее:

- изменение температуры в ходе синтеза от 150 до 240 °С не меняет структуру порошков $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, на дифрактограммах видны пики, соответствующие кубической структуре редкоземельного феррита-граната с элементом Sm;

- отдельных пиков, соответствующих элементам Sm, Fe и O_2 , нет, что подтверждает формирование в ходе синтеза материала на основе $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$;

- кроме пиков $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ дифрактограммы, возможно, содержат рефлексы фазы Fe_2O_3 , Sm_2O_3 и SmFeO_3 , что подтверждается результатами, представленными в работах [18, 19].

Спектры рамановского рассеяния самариевых ферритов-гранатов $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ представлены на рис. 2. Спектры всех трех образцов очень похожи вследствие их изоморфной структуры. Главными рамановскими активными модами гранатов являются $3A_{1g}+8E_g+14F_{2g}$ и рамановские пики обоснованно и качественно отнесены к внутренним, поступательным и вращательным модам [20, 21]. В соответствии с данными авторов [22] в нашем экспериментальном случае идентификация всех наблюдаемых рамановских мод такова, как обозначено на рис. 2. На основании результатов XRD с использованием метода групп мест, предложенного Руссо и соавт. [23], было рассчитано распределение степеней свободы в неприводимых представлениях Oh фактора группы. Согласно этому методу в центре зоны Бриллюэна имеется 98 режимов вибрации, но 55 ($5A_{1u} + 5A_{2g} + 5A_{2u} + 10E_u + 14F_{1g} + 16F_{2u}$) молчат, и только F_{1u} является акустической модой. Таким образом, анализ теории групп предсказывает 17 инфракрасных ($17F_{1u}$) и 25 рамановских ($3A_{1g} + 8E_g + 14 F_{2g}$) активных мод. На рис. 3 [23] приведена корреляционная диаграмма катионов и FeO_4 тетраэдров в О-точечной группе; 14 внутренних режимов группы FeO_4 ($2\nu_1, 4\nu_2, 4\nu_3$ и $4\nu_4$), как и ожидалось, наблюдаются в спектрах рамановского рассеяния, тогда как 7 мод ($\nu_2, 3 \nu_3$ и $3 \nu_4$) должны быть в Фурье-ИК спектрах (FT-IR).

Магнитные свойства ферритов связаны с их микроструктурой, морфологией, размером частиц, кристалличностью и составом. Нами были получены гистерезисные петли синтезированных образцов на вибромагнетометре Quantum Design Physical Property Measurement System (Quantum Design PPMS). На рис. 4 представлены петли магнитного гистерезиса (M – H) образцов, синтезированных при 150, 180, 200 °С. Магнитные характеристики образцов сведены в табл. 1. Значения намагниченности насыщения (M_s), полученные экстраполяцией кривых M и H к H = 0, составляют 0,59; 0,09; 0,38 эму/г соответственно. Из полученных изображений петель гистерезиса следует отметить низкую намагниченность насыщения, небольшие остаточную намагниченность и коэрцитивную силу.

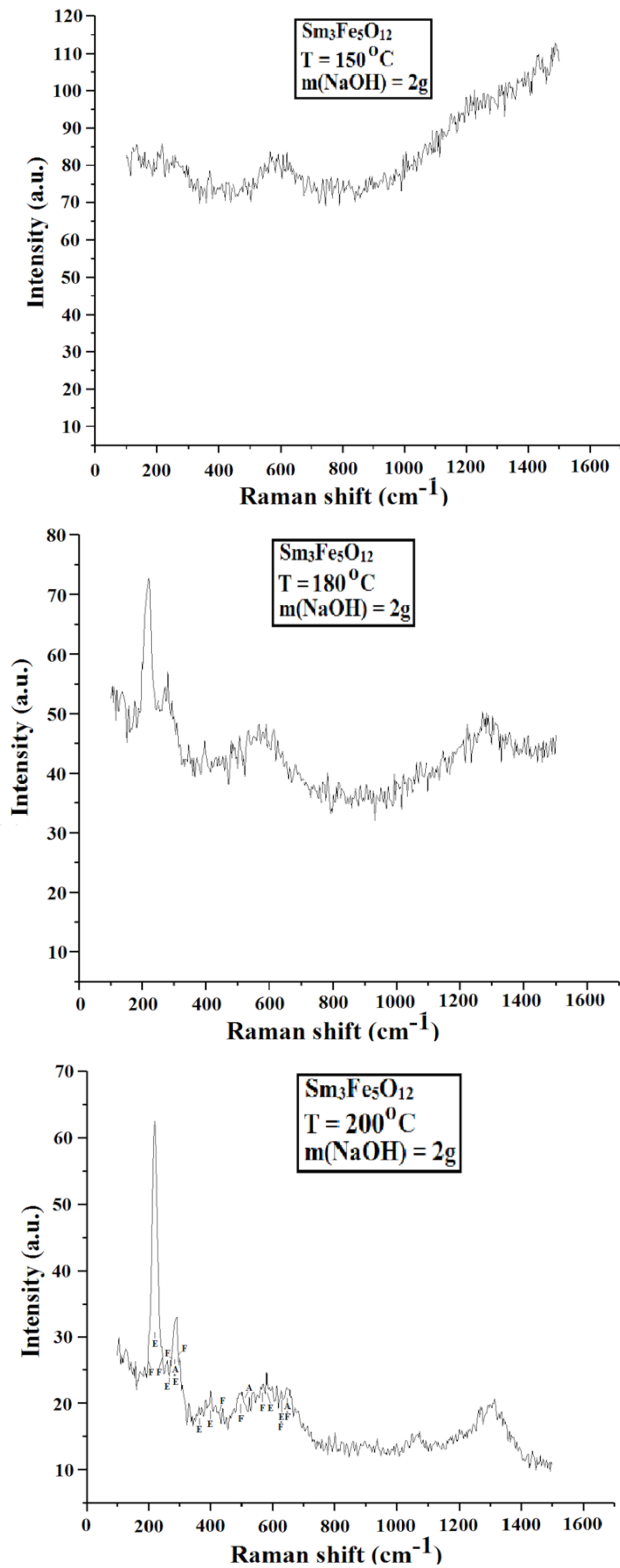


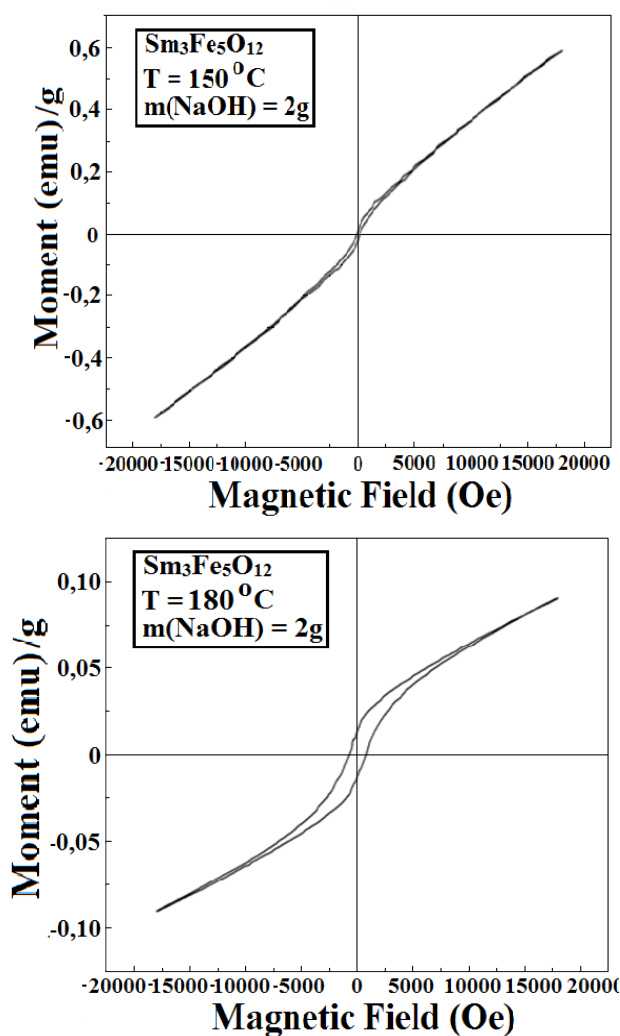
Рис. 2. Спектры рамановского рассеяния порошков $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

Correlation table for $R_3\text{Fe}_2(\text{FeO}_4)_3$. The translation T_u , T_2 and T refer to $\text{Fe}(1)^{3+}$, R^{3+} and $[\text{Fe}(2)\text{O}_4]^{5-}$, respectively.

Ionic species	Free ion sym.	Site sym.	Unit cell symm.	Vibrational modes
$\text{Fe}(1)-T_1$	-	S_6 A_2 $E_{g,2}$	O_h F_{1u}	$17F_{1u}(v_2, 3v_3, 3v_4, 2L, 3T, 2T_1, 3T_2)$
$\text{R}^{3+}-T_2$	-	D_2 B_1 B_2 B_3	A_{1g} E_g F_{2g}	$3A_{1g}(v_1, v_2, L)$ $8E_g(v_1, 2v_2, v_3, v_4, L, T, T_2)$ $14F_{2g}(v_2, 3v_3, 3v_4, 2L, 3T, 2T_2)$
$[\text{Fe}(2)\text{O}_4]^{5-}$	T_d $(v_1)A_1$ $(v_2)E$ $(R)F_1$ $(T, v_3, v_4)F_2$	S_4 A B E		

The rotational (R) degree of freedom of the free molecule becomes librational (L) lattice mode in the crystal.

Рис. 3

Рис. 4. Петли магнитного гистерезиса образцов $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

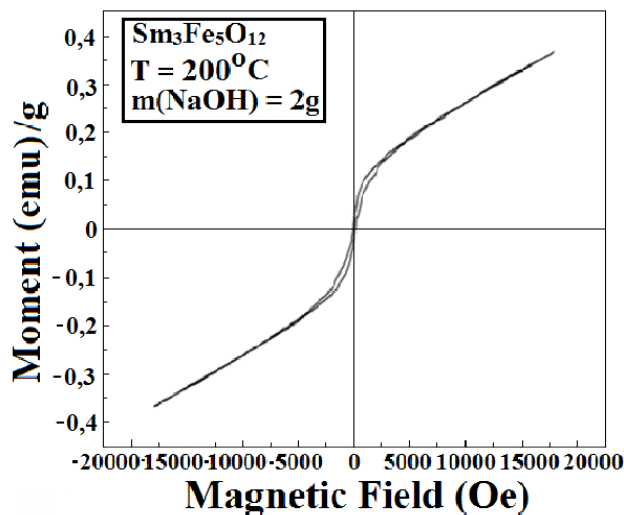


Рис. 4. Окончание

Таблица 1

Магнитные характеристики образцов $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

Образцы	Остаточная намагниченность M_s (emu/g)	Намагниченность насыщения I_s (emu/g)	Коэрцитивная сила H_c (Э)
Sm 150 °C 2g	0,05	0,59	100
Sm 180 °C 2g	0,02	0,09	1000
Sm 200 °C 2g	0,034	0,38	110

3. Обсуждение

В последнее десятилетие ведется изучение магнитных свойств наноструктурированных материалов, физические характеристики которых определяются содержащимися в них наноструктурами, свойства которых, в свою очередь, связаны с проявлением квантовых размерных эффектов и зависят от критического размера наноструктурного элемента. Закономерности изменения магнитной восприимчивости в зависимости от размера частиц для диа- и парамагнетиков пока не установлены, но известно, что магнитная восприимчивость прямо зависит от концентрации дефектов кристаллической решетки.

В связи с тем, что магнитные свойства материалов зависят от расстояния между атомами, можно предположить, что намагниченность насыщения I_s , температура Кюри T_c и другие параметры ферромагнитного состояния будут отличны от аналогичных характеристик крупнокристаллических объектов.

Заключение

Изменением температуры проведения мягкого гидротермального синтеза можно успешно управлять магнитными свойствами ферритов самария с различной морфологией частиц.

Библиографический список

1. Electric Conduction of Thin Oxide Films of CoO_x and NiO_x / P. A. Tikhonov, A. T. Nakusov, V. N. Bykov, N. V. Plamadyala, V. S. Rodionov // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 11. – С. 25–30.
2. Influence of Synthesis Method on Physical Properties of In_2O_3 Films / P. A. Tikhonov, A. T. Nakusov, S. B. Kocheregin, M. V. Bestaev, M. V. Kalinina, I. A. Drozdova // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 4. – С. 24–31.
3. Specific Features of Optical Anisotropy in Terbium Iron and Terbium Gallium Garnets / A. D. Pashkov, A. K. Khubaev, N. I. Tsidaeva, V. V. Abaeva, A. M. Turiev, E. V. Enaldieva, T. G. Butkhuzi, S. A. Khaimanov, A. G. Ramonova // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-2. – С. 116–118.
4. Anisotropy of the Linear Magnetic Birefringence of Europium Iron Garnet / A. K. Khubaev, A. D. Pashkov, N. I. Tsidaeva, V. V. Abaeva, A. M. Turiev, E. V. Enaldieva, T. G. Butkhuzi, S. A. Khaimanov, A. G. Ramonova // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-2. – С. 131–132.
5. Specific Features of Magneto-Optical Anisotropy of Europium Iron Garnet / N. I. Tsidaeva, S. A. Khaimanov, A. M. Turiev, V. V. Abaeva, A. K. Khubaev // 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Book of abstracts. – 2014. – С. 874.
6. Исследование сенсорных свойств высокодисперсных поликристаллических пленок на основе оксидов кобальта, никеля и празеодима / П. А. Тихонов, А. Т. Накусов, И. А. Дроздова, М. В. Калинина, А. И. Доманский // Физика и химия стекла. – 2005. – Т. 31, № 5. – С. 962–974.
7. **Niyaifar, M.** Effects of structural distortion on magnetic properties of $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ / M. Niyaifar, H. Mohammadpour, N. Khalafi // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 688. – P. 357–362.
8. A phytic acid modified CoFe_2O_4 magnetic adsorbent with controllable morphology, excellent selective adsorption for dyes and ultra-strong adsorption ability for metal ions / K. Cai, W. Shen, B. Ren, J. He, S. Wu, W. Wang // Chemical Engineering Journal. – 2017. – Vol. 330. – P. 936–946.
9. Effect of the rare earth substitution on the structural, magnetic and adsorption properties in cobalt ferrite nanoparticles / X. Wu, Z. Ding, N. Song, L. Li, W. Wang. // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42, № 3. – P. 4246–4255.
10. Crystal shape tailoring in perovskite structure rare-earth ferrites REFeO_3 (RE = La, Pr, Sm, Dy, Er, and Y) and shape-dependent magnetic properties of YFeO_3 / L. Yuan et al. // Crystal Growth & Design. – 2016. – Vol. 16, № 11. – P. 6522–6530.
11. From nanosphere to nanorod: Tuning morphology, structure and performance of cobalt ferrites via Pr^{3+} doping / X. Wu, W. Wang, N. Song, X. Yang, S. Khaimanov, N. Tsidaeva // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 306. – P. 382–392.
12. Preparation of samarium iron garnet nanoparticles via modified conventional mixing oxides method / R. Al Habashi, Z. Abbas // Journal of Nanoparticle Research. – 2014. – Vol. 29. – P. 59–64.
13. Structure, optical spectroscopy properties and thermochromism of $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ garnets / H. Liu et al. // Journal of Materials Chemistry. – 2016 – Vol. 4, № 44. – P. 10529–10537.
14. Temperature dependent Raman scattering and electronic transitions in rare earth SmFeO_3 / S. Gupta, R. Medwal, S. P. Pavunny, D. Sanchez, R. S. Katiyar // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44, № 4. – P. 4198–4203.
15. Micro-to-nano domain structure and orbital hybridization in rare-earth-doped BiFeO_3 across morphotropic phase boundary / C.-S. Chen et al. // Journal of the American Ceramic Society. – 2018. – Vol. 101, № 2. – P. 883–896.
16. Hydrothermal synthesis, characterization and magnetic properties of rare earth iron garnets $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ / L. Guo, H.-M. Yuan, K.-K. Huang, L. Yuan, S.-K. Liu,

- and S.-H. Feng // Chemical Research in Chinese Universities. – 2011. – Vol. 27, № 5. – P. 715–719.
17. A novel poly(m-phenylenediamine)/reduced graphene oxide/nickel ferrite magnetic adsorbent with excellent removal ability of dyes and Cr (VI) / W. Wang, K. Cai, X. Wu, X. Shao, X. Yang // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 722. – P. 532–543.
18. Magnetic nanosized rare earth iron garnets $R_3Fe_5O_{12}$: Sol–gel fabrication, characterization and reinspection / O. Opuchovic, A. Kareiva, K. Mazeika, D. Baltrunas // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 422. – P. 425–433.
19. Samarium-Iron Garnet Nanopowder Obtained by Co-Precipitation / V. R. Caffarena, T. Ogasawara, M. S. Pinho and J. L. Capitanio // Latin American Applied Research. – 2006. – Vol. 36. – P. 137–140.
20. Raman-active phonons in aluminum, gallium, and iron garnets / J. J. Song, P. B. Klein, R. L. Wadsack, M. Selders, S. Mroczkowski, R. K. Chang // Journal of the Optical Society of America. – 1973. – Vol. 63, № 9. – P. 1135–1140.
21. **Peng, M. S.** Raman Spectroscopy of Garnet-group Minerals / M. S. Peng, H. K. Mao, D. E. Li, C. T. Chao // Chinese Journal of Geochemistry. – 1994. – Vol. 13, № 2. – P. 176–183.
22. Synthesis, structure and vibrational properties of $GdIG_x:YIG_{1-x}$ ferromagnetic ceramic composite / P. B. A. Fechine, E. N. Silva, Menezes de A. S., J. Derov, J. W. Stewart, A. J. Drehman, I. F. Vasconcelos, A. P. Ayala, L. P. Cardoso, A. S. B. Sombra // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2009. – Vol. 70. – P. 202–209.
23. **Rousseau, D. L.** Normal Mode Determination in Crystals / D. L. Rousseau, R. P. Bauman, S. P. S. Porto // J. Raman Spectrosc. – 1981. – Vol. 10, № 1. – P. 253–290.

References

1. Tikhonov P. A., Nakusov A. T., Bykov V. N., Plamadyala N. V., Rodionov V. S. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and technical ceramics]. 2005, no. 11, pp. 25–30. [In Russian]
2. Tikhonov P. A., Nakusov A. T., Kocheregin S. B., Bestaev M. V., Kalinina M. V., Drozdova I. A. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and technical ceramics]. 2005, no. 4, pp. 24–31. [In Russian]
3. Pashkov A. D., Khubaev A. K., Tsidaeva N. I., Abaeva V. V., Turiev A. M., Enaldieva E. V., Butkhuzi T. G., Khaimanov S. A., Ramonova A. G. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technology]. 2014, no. 5-2, pp. 116–118. [In Russian]
4. Khubaev A. K., Pashkov A. D., Tsidaeva N. I., Abaeva V. V., Turiev A. M., Enaldieva E. V., Butkhuzi T. G., Khaimanov S. A., Ramonova A. G. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technology]. 2014, no. 5-2, pp. 131–132. [In Russian]
5. Tsidaeva N. I., Khaimanov S. A., Turiev A. M., Abaeva V. V., Khubaev A. K. *59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Book of abstracts*. 2014, p. 874.
6. Tikhonov P. A., Nakusov A. T., Drozdova I. A., Kalinina M. V., Domanskiy A. I. *Fizika i khimiya stekla* [Physics and chemistry of glass]. 2005, vol. 31, no. 5, pp. 962–974. [In Russian]
7. Niyaifar M., Mohammadpour H., Khalafi N. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, vol. 688, pp. 357–362.
8. Cai K., Shen W., Ren B., He J., Wu S., Wang W. *Chemical Engineering Journal*. 2017, vol. 330, pp. 936–946.
9. Wu X., Ding Z., Song N., Li L., Wang W. *Ceramics International*. 2016, vol. 42, no. 3, pp. 4246–4255.

10. Yuan L. et al. *Crystal Growth & Design*. 2016, vol. 16, no. 11, pp. 6522–6530.
11. Wu X., Wang W., Song N., Yang X., Khaimanov S., Tsidaeva N. *Chemical Engineering Journal*. 2016, vol. 306, pp. 382–392.
12. Al Habashi R., Abbas Z. *Journal of Nanoparticle Research*. 2014, vol. 29, pp. 59–64.
13. Liu H. et al. *Journal of Materials Chemistry*. 2016, vol. 4, no. 44, pp. 10529–10537.
14. Gupta S., Medwal R., Pavunny S. P., Sanchez D., Katiyar R. S. *Ceramics International*. 2018, vol. 44, no. 4, pp. 4198–4203.
15. Chen C.-S. et al. *Journal of the American Ceramic Society*. 2018, vol. 101, no. 2, pp. 883–896.
16. Guo L., Yuan H.-M., Huang K.-K., Yuan L., Liu S.-K., Feng S.-H. *Chemical Research in Chinese Universities*. 2011, vol. 27, no. 5, pp. 715–719.
17. Wang W., Cai K., Wu X., Shao X., Yang X. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 722, pp. 532–543.
18. Opuchovic O., Kareiva A., Mazeika K., Baltrunas D. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017, vol. 422, pp. 425–433.
19. Caffarena V. R., Ogasawara T., Pinho M. S., Capitanio J. L. *Latin American Applied Research*. 2006, vol. 36, pp. 137–140.
20. Song J. J., Klein P. B., Wadsack R. L., Selders M., Mroczkowski S., Chang R. K. *Journal of the Optical Society of America*. 1973, vol. 63, no. 9, pp. 1135–1140.
21. Peng M. S., Mao H. K., Li D. E., Chao C. T. *Chinese Journal of Geochemistry*. 1994, vol. 13, no. 2, pp. 176–183.
22. Fechine P. B. A., Silva E. N., Menezes de A. S., Derov J., Stewart J. W., Drehman A. J., Vasconcelos I. F., Ayala A. P., Cardoso L. P., Sombra A. S. B. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2009, vol. 70, pp. 202–209.
23. Rousseau D. L., Bauman R. P., Porto S. P. S. *J. Raman Spectrosc.* 1981, vol. 10, no. 1, pp. 253–290.

Цидаева Наталья Ильинична

кандидат физико-математических наук,
доцент, директор Научно-образовательного центра
естественных наук, Северо-Осетинский
государственный университет
имени К. Л. Хетагурова (Россия,
г. Владикавказ, ул. Бутырина, 27)

E-mail: tsidaevan@mail.ru

Tsidaeva Natal'ya Il'ichna

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor, director
of Scientific and educational center
of natural sciences, North Ossetian State
University named after K. L. Khetagurov
(27 Butyrina street, Vladikavkaz, Russia)

Накусов Ахсарбек Таймуразович

кандидат химических наук, старший
научный сотрудник, Научно-образовательный центр естественных
наук, Северо-Осетинский
государственный университет
имени К. Л. Хетагурова (Россия,
г. Владикавказ, ул. Бутырина, 27)

E-mail: shasha_nat@mail.ru

Nakusov Akhsarbek Taymurazovich

Candidate of chemical sciences, senior staff
scientist, Scientific and educational center
of natural sciences, North Ossetian State
University named after K. L. Khetagurov
(27 Butyrina street, Vladikavkaz, Russia)

Хайманов Спартак Александрович
инженер, Научно-образовательный
центр естественных наук, Северо-
Осетинский государственный
университет имени К. Л. Хетагурова
(Россия, г. Владикавказ,
ул. Бутырина, 27)

E-mail: sh_khaymanov@mail.ru

Хубаев Азамат Казбекович
аспирант, Научно-образовательный
центр естественных наук, Северо-
Осетинский государственный
университет имени К. Л. Хетагурова
(Россия, г. Владикавказ,
ул. Бутырина, 27)

E-mail: azamathubaev@mail.ru

Силаев Иван Вадимович
кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра физики
конденсированного состояния,
Северо-Осетинского государственного
университета имени К. Л. Хетагурова
(Россия, г. Владикавказ,
ул. Бутырина, 27)

E-mail: bigjonick@yandex.ru

Khaymanov Spartak Aleksandrovich
Engineer, Scientific and educational center
of natural sciences, North Ossetian State
University named after K. L. Khetagurov
(27 Butyrina street, Vladikavkaz, Russia)

Khubaev Azamat Kazbekovich
Postgraduate student, Scientific
and educational center of natural sciences,
North Ossetian State University named
after K. L. Khetagurov (27 Butyrina
street, Vladikavkaz, Russia)

Silaev Ivan Vadimovich
Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor,
sub-department of condensed matter
physics, North Ossetian State University
named after K. L. Khetagurov
(27 Butyrina street, Vladikavkaz, Russia)

Образец цитирования:

Исследование влияния температуры проведения гидротермального синтеза на свойства микро/наноструктурированных порошков феррита-граната самария / Н. И. Цидаева, А. Т. Накусов, С. А. Хайманов, А. К. Хубаев, И. В. Силаев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 105–116. – DOI 10.21685/2072-3040-2019-4-10.