

Выращивание монокристаллов замещенного алюминием гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ *

Стариков А.Ю., Винник Д.А.

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
vinnikda@susu.ru

Гудкова С.А.

Московский физико-технический институт
г. Москва, Российская Федерация
gudkovasa@susu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты отработки методики выращивания замещенного алюминием гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ методом спонтанной кристаллизации из раствора на основе оксида натрия. С помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM7001F, оснащенного энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным анализатором INCA X-max 80 (Oxford Instruments) установлен химический состав образцов: для $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ – 61,54%O, 35,53%Fe, 2,93%Sr; для $\text{SrFe}_{12-0,67}\text{Al}_{0,67}\text{O}_{19}$ – 61,99%O, 33,27%Fe, 2,76%Sr, 1,98%Al. Выявлено равномерное распределение ионов железа, стронция и алюминия, а также подтверждена монофазность полученных образцов. Проведено исследование кристаллической структуры методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Рассчитаны параметры кристаллической решетки для $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$: $a = 5,8792(8) \text{ \AA}$; $c = 23,011(3) \text{ \AA}$; $V = 688,83(13) \text{ \AA}^3$. Установлены температуры Кюри методом дифференциальной сканирующей калориметрии на Netzsch 449C Jupiter: для $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ – 450°C; для $\text{SrFe}_{12-0,67}\text{Al}_{0,67}\text{O}_{19}$ – 435°C.

Ключевые слова: феррит стронция, замещение алюминием, растворы, монокристаллы, магнитные материалы.

ВВЕДЕНИЕ

Термин “феррит” – используется для того чтобы сослаться на все магнитные оксиды содержащие железо как главный металлический компонент, который имеет исключительные технологические применения из-за своих ферромагнитных и изоляционных свойствах при комнатных температурах. Среди ферритов, гексагональные (гексаферриты) долгое время применялись в качестве постоянных магнитов и представляли интерес для микроволновых применений. В последнее время, наблюдается большой интерес к ферритам М-типа для применения в качестве электронных компонентов для мобильных или беспроводных коммуникаций микроволновых/ГГц частот, поглотителей электромагнитных волн, радиопоглощающих материалах и “стелс” технологиях в качестве композиционных материалов [1-12]. Из-за хороших значений диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости, данные материалы являются обнадеживающими для проектирования и создания устройств электроники

сверхвысоких частот. Магнитные свойства, свойственные гексаферритам, можно существенно улучшить замещая Fe^{3+} ионами различных металлов. Например, Cu^{2+} [13], Cr^{3+} [14, 15], Ga^{3+} [16], Ti^{4+} [17], Al^{3+} [18–20].

Среди наиболее распространенных ферритов со структурой магнетоплюмбита следует отметить гексаферрит бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ и гексаферрит стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$.

В данной работе была отработана масштабируемая методика получения монофазного порошка Al-замещенного гексаферрита стронция методом спонтанной кристаллизации, проведено исследование его кристаллической структуры и свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные компоненты использовались следующие: оксид железа (III) Fe_2O_3 , карбонат стронция SrCO_3 и растворитель на основе Na_2O . Подготовленная навеска подвергалась ультразвуковой гомогенизации. Далее, подготовленный порошок засыпали в платиновый тигель и проводили гомогенизацию расплава в печи сопротивления 3 часа с температурой 1260°C. После этого проводили охлаждение со скоростью 4 град/час до температуры 900°C. Затем охлаждение осуществлялось при выключенной печи до комнатной температуры. Из полученного сродка отделяли кристаллы путем кипячения в 30% азотной кислоте.

Исследование морфологии и состава полученного образца проводилось при помощи электронного микроскопа JEOL JSM-7001F с энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным спектрометром Oxford INCA X-max 80 для элементного анализа.

Рентгенофазовое исследование полученного образца проводилось на порошковом рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV. В исследовании применяли излучение медной трубки $\text{CuK}\alpha$ (λ составляла 1,541 Å) при ускоряющем напряжении 40 кВ. Рентгенограммы регистрировали в диапазоне углов 2θ от 5 до 90 град. с шагом 0,02 град. и скоростью съёмки 5 град/мин.

Температуру Кюри образца установили методом дифференциальной сканирующей калориметрии на Netzsch 449C Jupiter.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32 – 00663. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции “Материаловедение и металлургические технологии” (RusMetalCon-2018), <https://rusmetalcon.susu.ru>

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Исследование элементного состава полученного образца феррита стронция подтвердило присутствие четырех элементов: O, Fe, Sr, Al. Усредненное значение количества катионов образца приведено в табл. 1. Картирование по элементам показало равномерное распределение стронция и алюминия по всей поверхности, а также наличие только одной фазы в образце.

Таблица 1

Усредненный состав образцов

Брутто формула	Содержание ат. %			
	O	Fe	Sr	Al
SrFe ₁₂ O ₁₉	61,54	35,53	2,93	–
SrFe _{12-0,67} Al _{0,67} O ₁₉	61,99	33,27	2,76	1,98

На рис. 1 приведена рентгенограмма для SrFe₁₂O₁₉, SrFe_{12-x}Al_xO₁₉, а также литературная [22].

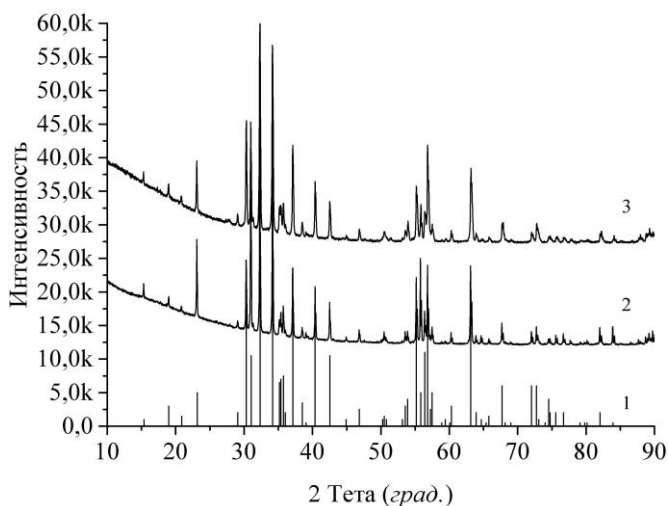


Рис. 1. Рентгенограммы образцов:

1 – литературные данные [21]; 2 – образец SrFe₁₂O₁₉; 3 – образец SrFe_{12-0,67}Al_{0,67}O₁₉

Рентгеноструктурный анализ дал возможность определить параметры ячеек образца, которые представлены ниже. Для сравнения приведены параметры кристаллической решетки из работы [21] табл. 2.

Таблица 2

Параметры решетки

Данные	Параметры		
	a, Å	c, Å	V, Å ³
[21]	5,8868(5)	23,037(2)	691,3
[22]	5,8832(14)	23,0361(14)	690,51(6)
	5,8833(3)	23,0379(11)	690,59(5)
SrFe _{12-0,67} Al _{0,67} O ₁₉	5,8792(8)	23,011(3)	688,83(13)

На основе полученных экспериментальных данных установлено, что при замещении железа алюминием происходит снижение значений параметров кристаллической решетки. Это может быть обусловлено отличиями значе-

ний ионных радиусов. Для координационного числа 4 значения ионных радиусов равны $r(\text{Al}^{3+}) = 0,53 \text{ \AA}$; $r(\text{Fe}^{3+}) = 0,63 \text{ \AA}$ [23].

Исходя из данных приведенных на рис. 2 можно сделать вывод о том, что отклонение температур экстремумов функций теплового эффекта, а значит и теплоемкости от температуры вблизи точки Кюри образцов незначительное.

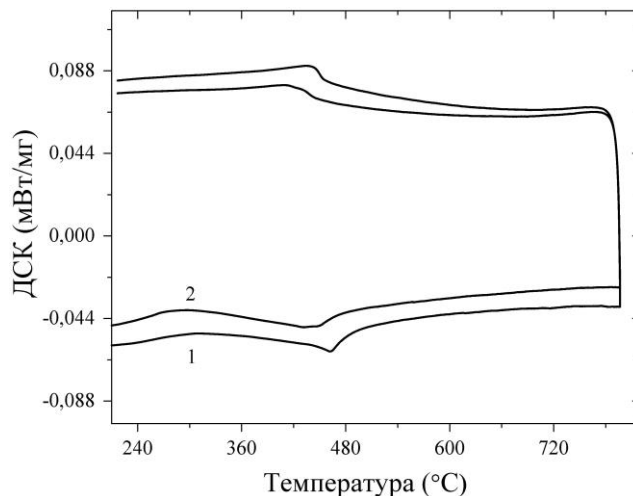


Рис. 2. Кривые ДСК образцов:

1 – образец SrFe₁₂O₁₉; 2 – образец SrFe_{12-x}Al_xO₁₉

С помощью программного обеспечения Netzsch провели дифференцирование тепловых эффектов по температуре и установили экстремумы зависимости удельной теплоемкости от температуры на нагреве и охлаждении.

Значение температур Кюри определяли как среднее арифметическое экстремумов зависимости производной теплового эффекта от температуры, которые равны: для SrFe₁₂O₁₉ – 450°C; для SrFe_{12-0,67}Al_{0,67}O₁₉ – 435°C.

Таким образом, установлено, что замещение ионов железа ионами алюминия приводит к снижению температурной области устойчивости ферромагнитного состояния материала, что имеет важное значение для применяемых на практике материалов. Снижение температуры Кюри вероятно обусловлено снижением межобменного взаимодействия в полученном материале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты выращивания монокристаллов Al-замещенного феррита стронция из раствора на основе оксида натрия методом спонтанной кристаллизации. Проведен рентгенофазовый анализ полученных кристаллов и чистого SrFe₁₂O₁₉. Вычислены значения параметров кристаллической решетки: a – 5,8792(8) Å; c – 23,011(3) Å; V – 688,83(13) Å³. Выполнен элементный анализ (содержание в ат.%): для SrFe₁₂O₁₉ – 61,54%O, 35,53%Fe, 2,93%Sr; для SrFe_{12-0,67}Al_{0,67}O₁₉ – 61,99%O, 33,27%Fe, 2,76%Sr, 1,98%Al. Определена температура Кюри: для SrFe₁₂O₁₉ – 450°C; для SrFe_{12-0,67}Al_{0,67}O₁₉ – 435°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sivakumar, M. Nanophase formation of strontium hexaferrite fine powder by the sonochemical method using $\text{Fe}(\text{CO})_5$, / M. Sivakumar, A. Gedanken, W. Zhong et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – vol. 268, is. 1–2. – P. 95–104. DOI: 10.1016/S0304-8853(03)00479-7
2. Muhammad, J.I. Enhancement of electrical resistivity of $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ nanomaterials by doping with lanthanum and nickel / J.I. Muhammad, F. Saima // Materials Chemistry and Physics. – 2009. – vol. 118, is. 2–3. – P. 308–313. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2009.07.056
3. Fu, Y.P. Strontium hexaferrite powders prepared by a microwave-induced combustion process and some of their properties / Y.P. Fu, C.H. Lin, K.Y. Pan // J. Alloys Compd. – 2003. – vol. 349, is. 1–2. – P. 228–231. DOI: 10.1016/S0925-8388(02)00867-8
4. Synthesis, physical, magnetic and electrical properties of Al–Ga substituted co-precipitated nanocrystalline strontium hexaferrite / J.I. Muhammad, N.A. Muhammad, H.-G. Pablo, M. Jose Maria // J. Magn. Magn. Mater. – 2008. – vol. 320, is. 6. – P. 881–886. DOI: 10.1016/j.jmmm.2007.09.005
5. Ketov, S.V. Structure and magnetic properties of nanocrystalline $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ alloy produced by high-energy ball milling and annealing / S.V. Ketov, Yu.D. Yagodkin, A.L. Lebed, Yu.V. Chernopyatova, K. Khlopov // J. Magn. Magn. Mater. – 2006. – vol. 300, is. 1. – P. e479–e481. DOI: 10.1016/j.jmmm.2005.10.199
6. Xu, P. Synthesis and Magnetic Properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ Hexaferrite Nanoparticles by a Reverse Microemulsion Technique / P. Xu, X.J. Han, M.J. Wang // J. Phys. Chem. C. – 2007. – vol. 111, is. 16. – P. 5866–5870. DOI: 10.1021/jp068955c
7. Jacobo, S.E. Influence of the iron content on the formation process of substituted Co–Nd strontium hexaferrite prepared by the citrate precursor method / S.E. Jacobo, C. Herme, P.G. Bercoff // J. Alloys Compd. – 2010. – vol. 495, is. 2. – P. 513–515. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.10.172
8. Sheenu, J. Structural, morphological, magnetic and optical properties of chromium substituted strontium ferrites, $\text{SrCr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$ ($x = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ and 2.5) annealed with potassium halides / J. Sheenu, S. Jagdish, C. Kailash, S. Bansai, S. Sonal // Powder Technol. – 2011. – vol. 212, is. 1. – P. 193–197. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.05.014
9. Asghar, G. Structural, dielectric and magnetic properties of Cr–Zn doped strontium hexa-ferrites for high frequency applications / G. Asghar, M. Anis-ur-Rehman // J. Alloys Compd. – 2012. – vol. 526. – P. 85–90. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.02.086
10. Kuo, H.M. Microwave adsorption of core–shell structured $\text{Sr}(\text{MnTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}/\text{PANI}$ composites / H.M. Kuo, Te-Fa. Hsui, Y.S. Tuo, C.L. Yuan // J. Mater. Sci. – 2012. – vol. 47, is. 5. – P. 2264–2270. DOI: 10.1007/s10853-011-6038-y
11. Ali Sharbati. Microwave absorption studies of nanocrystalline $\text{SrMn}_{x/2}(\text{TiSn})_{x/4}\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$ prepared by the citrate sol–gel method / Sharbati Ali, Khani Javad Mola Verdi, Amiri Gholam Reza // Solid State Commun. – 2012. – vol. 152, is. 3. – P. 199–203. DOI: 10.1016/j.ssc.2011.11.009
12. Muhammad Naem Ashiq. Synthesis, magnetic and dielectric properties of Er–Ni doped Sr-hexaferrite nanomaterials for applications in High density recording media and microwave devices / Ashiq Muhammad Naem, Iqbal Muhammad Javed, Najam-ul-Haq Muhammad, Gomez Pablo Hernandez, Qureshi Ashfaq Mahmood // J. Magn. Magn. Mater. – 2012. – vol. 324, is. 1. – P. 15–19. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.07.016
13. You, L.Q. The magnetic properties of strontium hexaferrites with La–Cu substitution prepared by SHS method / L.Q. You, J. Zheng // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – vol. 318, is. 1–2. – P. 74–78. DOI: 10.1016/j.jmmm.2007.04.028
14. Ounnunkada, S. Properties of Cr-substituted M-type barium ferrites prepared by nitrate–citrate gel-autocombustion process / S. Ounnunkada, P. Winotai // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – vol. 301, is. 2. – P. 292–300. DOI: 10.1016/j.jmmm.2005.07.003
15. Nourbakhsh A.A. The effect of nano sized $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ additions on the magnetic properties of chromium-doped strontium-hexaferrite ceramics / A.A. Nourbakhsh, M. Noorbakhsh, M. Nourbakhsh, M. Shaygan, K.J.D. Mackenzie // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2011. – vol. 22, is. 9. – P. 1297–1302. DOI: 10.1007/s10854-011-0303-3
16. Clark, T.M. ^{57}Fe Mössbauer spectroscopic investigation of complex magnetic structures in Ga, Sc, and In substituted M-type hexagonal ferrites / T.M. Clark, B.J. Evans, G.K. Thomson // Journal of Applied Physics. – 1999. – vol. 85, № 8. – P. 5229–5230. DOI: 10.1063/1.369952
17. Castellanos, P.A.M. Magnetic and microstructural properties of the Ti^{4+} – doped Barium hexaferrite / P.A.M. Castellanos, J.A. Rivera, A.C. Fuentes, R.L. Serrano // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – vol. 280, is. 2–3. – P. 214–220. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.03.015
18. Albanese, G. Magnetic and Mössbauer study of Al, Ga, In and Sc substituted $\text{Zn}_2\text{-W}$ hexagonal ferrites / G. Albanese, M. Carbuicchio, L. Pareti et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1980. – vol. 15–18, part 3. – P. 1453–1454. DOI: 10.1016/0304-8853(80)90365-0
19. Vinod, N.D. Structural and magnetic behaviour of aluminium doped barium hexaferrite nanoparticles synthesized by solution combustion technique / Vinod N. Dhage, M.L. Mane, A.P. Keche, C.T. Birajdar, K.M. Jadhav // Physica B: Condensed Matter. – 2011. – vol. 406, is. 4. – P. 789–793. DOI: 10.1016/j.physb.2010.11.094
20. Eraky, M.R. Magnetic properties and NMR studies of the SrAlM hexagonal ferrite system / M.R. Eraky, A.A. Beslepkin, S.P. Kuntsevich // Materials Letters. – 2003. – vol. 57, is. 22–23. – P. 3427–3430. DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00092-2
21. Marlene, C.M. Standard X-ray Diffraction Powder Patterns: Monogr. 25 – Sec. 18 / M.C. Marlene, McMurdie F. Howard, Evans H. Eloise. – Washington: Nat. Bur. Stand. (U.S.), 1981. – P. 110.
22. Винник, Д.А. Выращивание монокристаллов феррита стронция из раствора / Д.А. Винник, Л.С. Машковцева, С.А. Гудкова, Д.А. Жеребцов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 34–39. DOI: 10.14529/met160205
23. Shannon, R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides / R.D. Shannon // Acta Crystallographica. – 1976. – vol. A32. – P. 751–767. DOI: 10.1107/S0567739476001551

Single Crystal Growth of Aluminum substituted Strontium Hexaferrite $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$

Starikov A.Yu., Vinnik D.A.
South Ural State University
(national research university)
Chelyabinsk, Russian Federation
vinnikda@susu.ru

Gudkova S.A.
Moscow Institute of Physics and Technology
Moscow, Russian Federation
gudkovasa@susu.ru

Abstract. The paper presents the results of testing the technique for obtaining Al-substituted strontium hexaferrite $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ by spontaneous crystallization method. Using the scanning electron microscope JEOL JSM7001F equipped with an energy dispersive X-ray fluorescence analyzer INCA X-max 80 (Oxford Instruments), the chemical composition of the samples was established: for $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ – 61,54%O, 35,53%Fe, 2,93%Sr; for $\text{SrFe}_{12-0,67}\text{Al}_{0,67}\text{O}_{19}$ – 61,99%O, 33,27%Fe, 2,76%Sr, 1,98%Al. A uniform distribution of iron, strontium and aluminum ions was detected. It was found that the samples obtained are monophasic. The crystal structure was studied by X-ray phase analysis using a Rigaku Ultima IV diffractometer. The crystal lattice parameters of the obtained sample are calculated for $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$: a – 5,8792(8) Å; c – 23,011(3) Å; V – 688,83(13) Å³. The Curie temperatures were determined by differential scanning calorimetry: for $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ – 450°C; for $\text{SrFe}_{12-0,67}\text{Al}_{0,67}\text{O}_{19}$ – 435°C on the Netzsch 449C Jupiter.

Keywords: strontium ferrite, substitution by aluminum, single crystals, magnetic materials.

REFERENCES

- Sivakumar, M. Nanophase formation of strontium hexaferrite fine powder by the sonochemical method using $\text{Fe}(\text{CO})_5$, / M. Sivakumar, A. Gedanken, W. Zhong et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – vol. 268, is. 1–2. – P. 95–104. DOI: 10.1016/S0304-8853(03)00479-7
- Muhammad, J.I. Enhancement of electrical resistivity of $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ nanomaterials by doping with lanthanum and nickel / J.I. Muhammad, F. Saima // Materials Chemistry and Physics. – 2009. – vol. 118, is. 2–3. – P. 308–313. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2009.07.056
- Fu, Y.P. Strontium hexaferrite powders prepared by a microwave-induced combustion process and some of their properties / Y.P. Fu, C.H. Lin, K.Y. Pan // J. Alloys Compd. – 2003. – vol. 349, is. 1–2. – P. 228–231. DOI: 10.1016/S0925-8388(02)00867-8
- Synthesis, physical, magnetic and electrical properties of Al–Ga substituted co-precipitated nanocrystalline strontium hexaferrite / J.I. Muhammad, N.A. Muhammad, H.-G. Pablo, M. Jose Maria // J. Magn. Magn. Mater. – 2008. – vol. 320, is. 6. – P. 881–886. DOI: 10.1016/j.jmmm.2007.09.005
- Ketov, S.V. Structure and magnetic properties of nanocrystalline $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ alloy produced by high-energy ball milling and annealing / S.V. Ketov, Yu.D. Yagodkin, A.L. Lebed, Yu.V. Chernopyatova, K. Khlopkov // J. Magn. Magn. Mater. – 2006. – vol. 300, is. 1. – P. e479–e481. DOI: 10.1016/j.jmmm.2005.10.199
- Xu, P. Synthesis and Magnetic Properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ Hexaferrite Nanoparticles by a Reverse Microemulsion Technique / P. Xu, X.J. Han, M.J. Wang // J. Phys. Chem. C. – 2007. – vol. 111, is. 16. – P. 5866–5870. DOI: 10.1021/jp068955c
- Jacobo, S.E. Influence of the iron content on the formation process of substituted Co–Nd strontium hexaferrite prepared by the citrate precursor method / S.E. Jacobo, C. Herme, P.G. Bercoff // J. Alloys Compd. – 2010. – vol. 495, is. 2. – P. 513–515. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.10.172
- Sheenu, J. Structural, morphological, magnetic and optical properties of chromium substituted strontium ferrites, $\text{SrCr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$ (x = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5) annealed with potassium halides / J. Sheenu, S. Jagdish, C. Kailash, S. Bansai, S. Sonal // Powder Technol. – 2011. – vol. 212, is. 1. – P. 193–197. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.05.014
- Asghar, G. Structural, dielectric and magnetic properties of Cr–Zn doped strontium hexa-ferrites for high frequency applications / G. Asghar, M. Anis-ur-Rehman // J. Alloys Compd. – 2012. – vol. 526. – P. 85–90. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.02.086
- Kuo, H.M. Microwave adsorption of core–shell structured $\text{Sr}(\text{MnTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ /PANI composites / H.M. Kuo, Te-Fa. Hsui, Y.S. Tuo, C.L. Yuan // J. Mater. Sci. – 2012. – vol. 47, is 5. – P. 2264–2270. DOI: 10.1007/s10853-011-6038-y
- Ali Sharbati. Microwave absorption studies of nanocrystalline $\text{SrMn}_{x/2}(\text{TiSn})_{x/4}\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$ prepared by the citrate sol–gel method / Sharbati Ali, Khani Javad Mola Verdi, Amiri Gholam Reza // Solid State Commun. – 2012. – vol. 152, is. 3. – P. 199–203. DOI: 10.1016/j.ssc.2011.11.009
- Muhammad Naeem Ashiq. Synthesis, magnetic and dielectric properties of Er–Ni doped Sr-hexaferrite nanomaterials for applications in High density recording media and microwave devices / Ashiq Muhammad Naeem, Iqbal Muhammad Javed, Najam-ul-Haq Muhammad, Gomez Pablo Hernandez, Qureshi Ashfaq Mahmood // J. Magn. Magn. Mater. – 2012. – vol. 324, is 1. – P. 15–19. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.07.016
- You, L.Q. The magnetic properties of strontium hexaferrites with La–Cu substitution prepared by SHS method / L.Q. You, J. Zheng // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – vol. 318, is 1–2. – P. 74–78. DOI: 10.1016/j.jmmm.2007.04.028
- Ounnunkada, S. Properties of Cr-substituted M-type barium ferrites prepared by nitrate–citrate gel-autocombustion process / S. Ounnunkada, P. Winotai // Journal of Magnetism

and Magnetic Materials. – 2006. – vol. 301, is. 2. – P. 292–300. DOI: 10.1016/j.jmmm.2005.07.003

15. Nourbakhsh A.A. The effect of nano sized SrFe₁₂O₁₉ additions on the magnetic properties of chromium-doped strontium-hexaferrite ceramics / A.A. Nourbakhsh, M. Nourbakhsh, M. Nourbakhsh, M. Shaygan, K.J.D. Mackenzie // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2011. – vol. 22, is. 9. – P. 1297–1302. DOI: 10.1007/s10854-011-0303-3

16. Clark, T.M. ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopic investigation of complex magnetic structures in Ga, Sc, and In substituted M-type hexagonal ferrites / T.M. Clark, B.J. Evans, G.K. Thomson // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – vol. 85, № 8. – P. 5229–5230. DOI: 10.1063/1.369952

17. Castellanos, P.A.M. Magnetic and microstructural properties of the Ti⁴⁺ – doped Barium hexaferrite / P.A.M. Castellanos, J.A. Rivera, A.C. Fuentes, R.L. Serrano // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2004. – 280, is. 2–3. – P. 214–220. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.03.015

18. Albanese, G. Magnetic and Mössbauer study of Al, Ga, In and Sc substituted Zn₂-W hexagonal ferrites / G. Albanese, M. Carbucicchio, L. Pareti et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1980. – vol. 15–18, part 3. – P. 1453–1454. DOI: 10.1016/0304-8853(80)90365-0

19. Vinod, N.D. Structural and magnetic behaviour of aluminium doped barium hexaferrite nanoparticles synthesized by solution combustion technique / Vinod N. Dhage, M.L. Mane, A.P. Keche, C.T. Birajdar, K.M. Jadhav // *Physica B: Condensed Matter*. – 2011. – vol. 406, is. 4. – P. 789–793. DOI: 10.1016/j.physb.2010.11.094

20. Eraky, M.R. Magnetic properties and NMR studies of the SrAlM hexagonal ferrite system / M.R. Eraky, A.A. Beslepkin, S.P. Kuntsevich // *Materials Letters*. – 2003. – vol. 57, is. 22–23. – P. 3427–3430. DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00092-2

21. Marlene, C.M. Standard X-ray Diffraction Powder Patterns: Monogr. 25 – Sec. 18 / M.C. Marlene, McMurdie F. Howard, Evans H. Eloise. – Washington: Nat. Bur. Stand. (U.S.), 1981. – P. 110.

22. Винник, Д.А. Выращивание монокристаллов феррита стронция из раствора / Д.А. Винник, Л.С. Машковцева, С.А. Гудкова, Д.А. Жеребцов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 34–39. DOI: 10.14529/met160205

23. Shannon, R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides / R.D. Shannon // *Acta Crystallographica*. – 1976. – vol. A32. – P. 751–767. DOI: 10.1107/S0567739476001551

Библиографическое описание статьи

Стариков А.Ю. Выращивание монокристаллов замещенного алюминием гексаферрита стронция SrFe_{12-x}Al_xO₁₉ / А.Ю. Стариков, Д.А. Винник, С.А. Гудкова // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2019. – Т.7, №1. – С. 30-34. DOI: 10.24892/RIJE/20190106

Reference to article

Starikov A.Yu., Vinnik D.A., Gudkova S.A. Single crystal growth of aluminum substituted strontium hexaferrite SrFe_{12-x}Al_xO₁₉, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2019, vol.7, no.1, pp. 30-34. DOI: 10.24892/RIJE/20190106