

УДК 544.02+537.622.4+537.31

Д. Д. Польшко, аспирант (БГТУ); Л. А. Башкиров, профессор (БГТУ); С. В. Труханов, ст. науч. сотрудник (Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению); Л. С. Лобановский, ст. науч. сотрудник (Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению)

### КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ СИСТЕМ $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ , $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$

Исследована кристаллическая структура ферритов систем  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$   $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ( $x \leq 0,5$ ). Установлена зависимость параметров кристаллической решетки от  $x$ . Петли гистерезиса получены при 6 и 300 К в магнитных полях до 14 Т. Исследована зависимость намагниченности насыщения и коэрцитивной силы от  $x$  при 6 и 300 К. Показано, что ферриты  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,2$ ) могут быть использованы для изготовления постоянных магнитов с характеристиками лучше, чем из  $SrFe_{12}O_{19}$  и  $Sr_{0,85}Ca_{0,15}Fe_{12}O_{19}$ .

Crystal structure of  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$   $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ , ( $x \leq 0,5$ ) ferrites is investigated. Find dependence lattice parameters  $a$  and  $c$  from  $x$ . Hysteresis curve is obtained at the temperatures 6 and 300 K in the magnetic fields up to 14 T. Defined dependence saturation magnetization and coercive force, from  $x$  at 6 and 300 K. Find, that ferrites  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,2$ ) can be used for making permanent magnets with better characteristics than  $SrFe_{12}O_{19}$  and  $Sr_{0,85}Ca_{0,15}Fe_{12}O_{19}$ .

**Введение.** Феррит стронция  $SrFe_{12}O_{19}$  со структурой магнетоплюмбита является магнитотвердым материалом, который применяется для изготовления керамических постоянных магнитов, широко используемых в различных областях науки и техники [1]. В работе [2] установлено, что в системе  $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  частичное замещение ионов стронция  $Sr^{2+}$  ионами  $La^{3+}$  и ионов  $Fe^{3+}$  ионами  $Co^{2+}$  до  $x = 0,2$  приводит к увеличению поля анизотропии и, следовательно, к росту коэрцитивной силы, в значительной степени определяющей энергетическое произведение  $(BH)_{max}$  постоянных магнитов, что позволило во Франции освоить производство постоянных магнитов из твердого раствора  $Sr_{0,8}La_{0,2}Fe_{11,8}Co_{0,2}O_{19}$  со значением энергетического произведения  $(BH)_{max} = 38,4$  кДж/м<sup>3</sup>.

В последние годы опубликован ряд работ, посвященных в основном изучению кристаллической структуры, спектров Мессбауэра и в меньшей степени исследованию магнитных свойств ферритов  $Sr_{1-x}Ln_xFe_{12-x}Fe^{2+}_xO_{19}$ ,  $Sr_{1-x}Ln_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ( $Ln - Pr, Nd$ ) [3–5].

Поскольку радиус ионов  $Ca^{2+}$  ( $r_{и} = 1,04$  Å) меньше радиуса ионов  $Sr^{2+}$  ( $r_{и} = 1,20$  Å) [6], то частичное замещение ионов  $Sr^{2+}$  в  $SrFe_{12}O_{19}$  ионами  $Ca^{2+}$  приводит к локальным напряжениям, вследствие чего возрастает коэрцитивная сила. Поэтому можно предположить, что введение ионов кальция в твердые растворы ферритов  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  приведет к повышению коэрцитивной силы и величины энергетического произведения  $(BH)_{max}$ .

Целью настоящей работы является изучение кристаллической структуры, намагниченности

насыщения, коэрцитивной силы ферритов  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ .

**Методика эксперимента.** Керамические образцы ферритов  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ( $x = 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5$ ) синтезированы твердофазным методом из оксидов празеодима ( $Pr_6O_{11}$ ), железа ( $Fe_2O_3$ ), кобальта ( $Co_3O_4$ ) и карбонатов стронция, кальция. Все реактивы имели квалификацию ч.д.а. Перемешивание и помол исходных соединений, взятых в необходимом соотношении, проводили в планетарной мельнице «Pulverizette 6» фирмы Fritsch с добавлением этанола. Полученную шихту (с добавлением этанола для улучшения прессуемости) прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 19 мм и высотой 5–7 мм, которые затем сушили на воздухе при 373 К и обжигали на подложках из оксида алюминия при температуре 1473 К на воздухе в течение 8 ч. После предварительного обжига таблетки дробили, мололи, прессовали и обжигали при 1473 К в течение 8 ч.

Рентгеновские дифрактограммы образцов ферритов получены на дифрактометре Bruker D8 (излучение  $CuK_{\alpha}$ ) при комнатной температуре. Намагниченность насыщения и параметры петли гистерезиса намагниченности образцов ферритов цилиндрической формы длиной 5,0–5,4 мм и диаметром 1–1,2 мм были измерены вибрационным методом при температурах 6 и 300 К в магнитном поле до 14 Т на универсальной высокополевой измерительной системе (Cryogenic Ltd, London, 41S) Института физики твердого тела и полупроводников «Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению».

**Результаты и их обсуждение.** Анализ рентгеновских дифрактограмм (рис. 1, 2) показал, что в системах  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  однофазными являются образцы при  $x \leq 0,3$ . На рентгеновских дифрактограммах образцов ферритов систем  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  при значениях  $x \geq 0,4$ , кроме рентгеновских линий, принадлежащих гексагональной структуре магнетоплюмбита, присутствуют также самые интенсивные линии  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

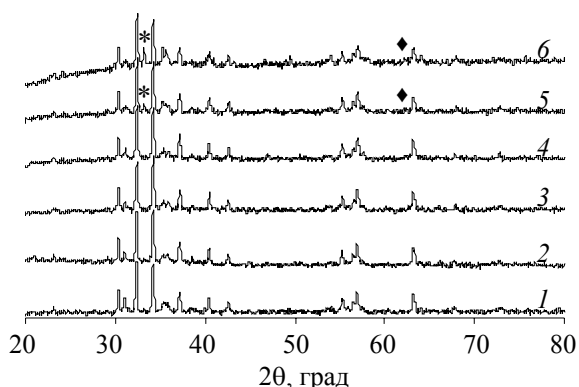


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов ферритов системы  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ :

$x = 0$  (1); 0,1 (2); 0,2 (3); 0,3 (4); 0,4 (5); 0,5 (6);

\* – рефлекс (104)  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ; ◆ – рефлекс (440)  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$

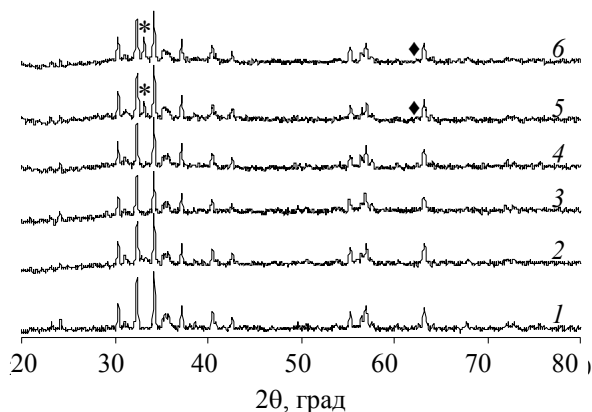


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов ферритов системы  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ :

$x = 0$  (1); 0,1 (2); 0,2 (3); 0,3 (4); 0,4 (5); 0,5 (6);

\* – рефлекс (104)  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ; ◆ – рефлекс (440)  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$

В области однофазности ( $x \leq 0,3$ ) параметр кристаллической решетки  $a$  ферритов систем  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  при увеличении степени замещения  $x$  до 0,3 уменьшается линейно (рис. 3, кривые 1, 2) по уравнениям  $a = 5,8869 - 0,0195x$  (Å),  $a = 5,8840 - 0,0115x$  (Å) соответственно. При увеличении степени замещения  $x$  от 0,3 до 0,4 параметр кристаллической решетки  $a$  увеличивается, причем для кальцийсодержащих ферритов

$(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  он увеличивается меньше, чем для системы  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ , а при дальнейшем увеличении до 0,5 он практически не изменяется.

Параметр кристаллической решетки  $c$  исследуемых ферритов систем  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  при увеличении значения степени замещения  $x$  до 0,3 возрастает линейно (рис. 3, кривые 3, 4) по уравнениям  $c = 23,027 + 0,4891x$  (Å),  $c = 23,028 + 0,2773x$  (Å) соответственно. В гетерофазной области ( $x = 0,4; 0,5$ ) параметр  $c$  кристаллической решетки ферритов системы  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  изменяется незначительно (рис. 3, кривая 3), для кальцийсодержащих ферритов системы  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  при увеличении  $x$  от 0,3 до 0,4 параметр  $c$  увеличивается, а для образцов при  $x = 0,4; 0,5$  он практически одинаков (рис. 3, кривая 4).

Пересечение линейных зависимостей параметра  $c$  гексагональной кристаллической решетки ферритов систем  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$   $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  от степени замещения  $x$  в областях  $0 \leq x \leq 0,3$ ,  $0,3 < x \leq 0,5$  наблюдается при значениях  $x \approx 0,30$ ,  $x \approx 0,35$  соответственно. Это указывает, что в исследуемых системах значения степени замещения  $x \approx 0,30$ ,  $0,35$  являются предельными для образования твердых растворов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ .

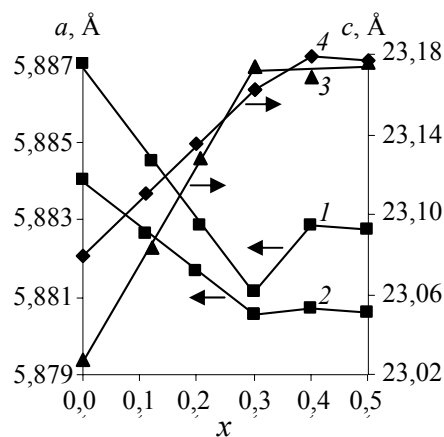


Рис. 3. Зависимость параметров  $a$  (1, 2),  $c$  (3, 4) гексагональной кристаллической решетки ферритов систем  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  (1, 3),  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  (2, 4) от степени замещения  $x$

Объем элементарной ячейки исследуемых систем  $V$  рассчитан по формуле  $V = 0,866025a^2c$ . Рентгеноструктурная плотность однофазных образцов ферритов исследуемых твердых растворов  $\rho_{\text{рент}}$  рассчитана по формуле  $\rho_{\text{рент}} = 2M / (N_A V)$ , где  $M$  – молярная масса феррита,  $N_A$  – число Авогадро. При  $x \leq 0,3$  объем элементарной

ячейки  $V$  твердых растворов ферритов систем  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  увеличивается линейно по уравнениям  $V = 691,13 + 10,07x$  ( $\text{Å}^3$ ),  $V = 691,99 + 5,61x$  ( $\text{Å}^3$ ) соответственно, а рентгеноструктурная плотность  $\rho_{\text{рент}}$  линейно возрастает от 5,102, 5,062 г/см<sup>3</sup> для ферритов  $SrFe_{12}O_{19}$ ,  $Sr_{0,85}Ca_{0,15}Fe_{12}O_{19}$  до 5,161, 5,141 г/см<sup>3</sup> для ферритов  $Sr_{0,7}Pr_{0,3}Fe_{11,7}Co_{0,3}O_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{0,7}Pr_{0,3}Fe_{11,7}Co_{0,3}O_{19}$ .

Для феррита  $SrFe_{12}O_{19}$  полученные значения параметров  $a$  и  $c$ , объема элементарной решетки  $V$  и рассчитанной рентгеноструктурной плотности  $\rho_{\text{рент}}$  равны 5,8869 и 23,027 Å, 691,13 Å<sup>3</sup>, 5,102 г/см<sup>3</sup> соответственно. Эти значения хорошо согласуются с литературными данными ( $a = 5,8844$  Å,  $c = 23,05(3)$  Å,  $V = 691,20$  Å<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{рент}} = 5,102$  г/см<sup>3</sup>).

Установлено, что замещение 15% ионов  $Sr^{2+}$ , ионный радиус  $r$  которых равен 1,20 Å, меньшими по размеру ионами  $Ca^{2+}$  ( $r = 1,04$  Å) приводит к уменьшению параметра  $a$  на 0,049% и увеличению параметра  $c$ , объема элементарной решетки  $V$  на 0,23 и 0,12% соответственно. Для твердых растворов ферритов  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  увеличение степени замещения  $x$  ионов щелочноземельных элементов  $Sr^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  меньшими по размеру ионами  $Pr^{3+}$  ( $r = 1,00$  Å) и ионов  $Fe^{3+}$  ( $r = 0,67$  Å) большими по размеру ионами  $Co^{2+}$  ( $r = 0,78$  Å) приводит к уменьшению параметра  $a$  и увеличению параметра  $c$  и объема элементарной решетки  $V$ . Следовательно, в исследованных системах  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  увеличение степени замещения  $x$  приводит к уменьшению межионных расстояний катион – ион кислорода по направлению оси  $a$  и к увеличению таких же межионных расстояний по направлению гексагональной оси  $c$ . При этом степень гексагональности  $c/a$  однофазных образцов ферритов  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Sr_{0,85}Ca_{0,15})_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  постепенно увеличивается по уравнениям:  $c/a = 3,918 + 0,0961x$ ,  $c/a = 3,9224 + 0,0548x$ .

Измерения удельной намагниченности  $\sigma$ , проведенные при температурах 6 и 300 К в

магнитных полях до 14 Т, показывают, что намагниченность насыщения исследуемых ферритов достигается в поле около 3 Т, выше которого наблюдается небольшое безгистерезисное возрастание намагниченности. По полученным при температурах 6 и 300 К петлям гистерезиса определяли удельную намагниченность насыщения  $\sigma_s$  и коэрцитивную силу  $\sigma_{H_C}$ , для однофазных образцов намагниченность насыщения  $n_s$ , выраженная в магнетонах Бора ( $\mu_B$ ) на одну формульную единицу феррита, рассчитана по формуле (1):

$$n_s = \frac{\sigma_s M}{5585}, \quad (1)$$

где  $M$  – молярная масса соответствующего феррита; 5585 – величина, равная произведению магнетона Бора ( $\mu_B$ ) на число Авогадро. Полученные результаты для ферритов исследуемых систем представлены в табл. 1, 2.

Из данных табл. 1 следует, что для ферритов  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  возрастание степени замещения  $x$  до 0,2 приводит к увеличению намагниченности насыщения  $n_s$  при 6 К от величины 19,79  $\mu_B$  для  $SrFe_{12}O_{19}$  до 20,31  $\mu_B$ . При дальнейшем увеличении  $x$  намагниченность  $n_s$  уменьшается ( $x = 0,3$ ,  $n_s = 20,10$   $\mu_B$ ). Увеличение намагниченности  $n_s$  для ферритов при  $x = 0,2$  на 0,52  $\mu_B$  по сравнению с намагниченностью  $SrFe_{12}O_{19}$  показывает, что ионы  $Co^{2+}$ , магнитный момент которых равен 3  $\mu_B$ , располагаются в А-подрешетке. В соответствии с двухподрешеточной моделью Гортера [7] намагниченность феррита стронция  $SrFe_{12}O_{19}$  равняется разности магнитных моментов В-подрешетки, в которой расположены 8 ионов  $Fe^{3+}$ , и А-подрешетки с четырьмя ионами  $Fe^{3+}$ , магнитный момент которых равен 5  $\mu_B$ . Если ионы  $Co^{2+}$  при образовании твердого раствора феррита  $Sr_{0,8}Pr_{0,2}Fe_{11,8}Co_{0,2}O_{19}$  располагаются в А-подрешетке, то для этого феррита теоретическое значение  $n_s$  можно выразить следующей формулой:  $n_s = (8 \cdot 5) - (3,8 \cdot 5 + 0,2 \cdot 3) = 20,40$   $\mu_B$ .

Таблица 1

**Намагниченность насыщения формульной единицы ( $n_s$ ), удельная намагниченность насыщения ( $\sigma_s$ ), коэрцитивная сила ( $\sigma_{H_C}$ ) ферритов системы  $Sr_{1-x}Pr_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  при температурах 6 и 300 К**

$x$	$T = 6$ К			$T = 300$ К		
	$n_s$ , $\mu_B$	$\sigma_{H_C}$ , Э	$\sigma_s$ , Гс·см <sup>3</sup> /Г	$n_s$ , $\mu_B$	$\sigma_{H_C}$ , Э	$\sigma_s$ , Гс·см <sup>3</sup> /Г
0	19,79	2700	104,10	15,79	3700	83,06
0,1	20,16	3090	105,48	16,23	4240	84,92
0,2	20,31	3200	105,71	16,31	4320	84,89
0,3	20,10	2990	104,07	15,20	4120	78,70
0,4	–	2020	97,91	–	3190	75,72
0,5	–	1870	95,26	–	2950	73,27

Таблица 2

**Намагниченность насыщения формульной единицы ( $n_s$ ), удельная намагниченность насыщения ( $\sigma_s$ ), коэрцитивная сила ( $\sigma_{H_C}$ ) ферритов системы  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  при температурах 6 и 300 К**

$x$	$T = 6 \text{ К}$			$T = 300 \text{ К}$		
	$n_s, \mu_B$	$\sigma_{H_C}, \text{Э}$	$\sigma_s, \text{Гс}\cdot\text{см}^3/\text{Г}$	$n_s, \mu_B$	$\sigma_{H_C}, \text{Э}$	$\sigma_s, \text{Гс}\cdot\text{см}^3/\text{Г}$
0	19,81	2800	104,91	15,84	3870	83,88
0,1	20,19	3070	106,28	16,19	4300	85,22
0,2	20,28	3250	106,12	16,27	4370	85,13
0,3	20,15	3090	104,81	15,12	4210	78,65
0,4	–	2040	98,10	–	3100	76,79
0,5	–	2010	94,95	–	3010	74,49

Эта величина намагниченности  $n_s$  для феррита  $\text{Sr}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$  на 0,4  $\mu_B$  больше, чем для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Экспериментально полученное увеличение  $n_s$  для этого твердого раствора равняется 0,52  $\mu_B$ , что подтверждает сделанное нами предположение о размещении ионов  $\text{Co}^{2+}$  в  $A$ -подрешетке феррита  $\text{Sr}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$ . Данные по намагниченности насыщения  $n_s$  при 6 К ферритов  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ , приведенные в табл. 2, показывают, что замещение 15%  $\text{Sr}^{2+}$  ионами  $\text{Ca}^{2+}$  не приводит к изменению распределения  $\text{Co}^{2+}$  между  $A$ - и  $B$ -подрешеткой.

При температуре 300 К величина намагниченности насыщения  $n_s$  ферритов системы  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  (табл. 1) при увеличении степени замещения  $x$  до 0,2 постепенно увеличивается от 15,79  $\mu_B$  для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до 16,31  $\mu_B$  и при дальнейшем увеличении  $x$  намагниченность насыщения  $n_s$  уменьшается. Для кальцийсодержащих ферритов при температуре 300 К (табл. 2) наблюдается аналогичная зависимость  $n_s$  от  $x$ .

В исследуемых системах коэрцитивная сила ( $\sigma_{H_C}$ ) (табл. 1, 2) достигает максимального значения при  $x = 0,2$  при температурах 6 и 300 К. Так, для ферритов системы  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  увеличение степени замещения  $x$  до 0,2 приводит при температурах 6 и 300 К к увеличению коэрцитивной силы  $\sigma_{H_C}$  от 2700 Э ( $T = 6 \text{ К}$ ), 3700 Э ( $T = 300 \text{ К}$ ) для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до 3200 Э ( $T = 6 \text{ К}$ ) и 4320 Э ( $T = 300 \text{ К}$ ) для  $\text{Sr}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$ . Для кальцийсодержащих ферритов  $\sigma_{H_C}$  возрастает от 2800 Э ( $T = 6 \text{ К}$ ), 3870 Э ( $T = 300 \text{ К}$ ) для  $\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  до 3250 Э ( $T = 6 \text{ К}$ ) и 4370 Э ( $T = 300 \text{ К}$ ) для  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$ .

Следует отметить (табл. 1, 2), что замещение части ионов  $\text{Sr}^{2+}$  ионами  $\text{Ca}^{2+}$  приводит к возрастанию коэрцитивной силы. Так, при 300 К коэрцитивная сила  $\sigma_{H_C}$  феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  увеличивается на 4,6% при замещении 15%  $\text{Sr}^{2+}$  ионами  $\text{Ca}^{2+}$ , а для

$\text{Sr}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$  такое замещение увеличивает коэрцитивную силу на 1,1%.

**Заключение.** Ввиду того, что намагниченность насыщения  $n_s$  при комнатной температуре для ферритов систем  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  при увеличении степени замещения  $x$  до 0,2 увеличивается на 3,3 и 2,7%, а коэрцитивная сила  $\sigma_{H_C}$  на 16,7 и 12,9% соответственно, то можно полагать, что постоянные магниты из ферритов исследованных систем при  $x = 0,1-0,2$  будут иметь энергетическое произведение  $(BH)_{\text{max}}$  выше, чем у магнитов из ферритов  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{Sr}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ .

#### Литература

1. Технология производства материалов магнито-электроники / Л. М. Летюк [и др.]; под общ. ред Л. М. Летюка. – М.: Металлургия, 1994. – 416 с.
2. Yamamoto, H. Magnetic properties of anisotropic sintered magnets using Sr – La – Co system powders by mechanical compounding method / H. Yamamoto, G. Obara // J. of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. – 2000. – Vol. 47. – P. 796–800.
3. Structural and magnetic properties of hydrothermally synthesised  $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  hexagonal ferrites / H. Mocuta [et al.] // J. of Alloys and Compounds. – 2004. – Vol. 364, Iss. 2. – P. 48–52.
4. Influence of the presence of Co on the rare earth solubility in M-type hexaferrite powders / L. Lechevallier [et al.] // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – Vol. 316, Iss. 2. – P. e109–e111.
5. On the solubility of rare earths in M-type  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  hexaferrite compounds / L. Lechevallier [et al.] // J. of Phys.: Condens. Matter. – 2008. – Vol. 20. – P. 175203–175212.
6. Шаскольская, М. П. Кристаллография / М. П. Шаскольская. – М.: Высш. шк., 1976. – 391 с.
7. Гортер, Е. В. Намагниченность насыщения и кристаллохимия ферритмагнитных окислов / Е. В. Гортер // Успехи физ. наук. – 1955. – Т. 57, № 2. – С. 273–346.

Поступила 31.03.2010