

УДК 541.124+546.431

У Цзэ, аспирант (БГТУ);

Л. А. Башкиров, доктор химических наук, профессор (БГТУ);

С. В. Слонская, кандидат химических наук, доцент (БГАТУ);

С. В. Труханов, старший научный сотрудник (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению);

Л. С. Лобановский, старший научный сотрудник (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению);

А. И. Галяс, старший научный сотрудник (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению)

### КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ФЕРРИТОВ $Sr_{1-x}Gd_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$

Твердофазным методом из оксидов  $Fe_2O_3$ ,  $Gd_2O_3$ ,  $ZnO$  и карбоната  $SrCO_3$  получены образцы высококоэрцитивных ферритов  $Sr_{1-x}Gd_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ ) со структурой магнетоплюмбита, определена зависимость параметров кристаллической ячейки  $a$  и  $c$  от величины  $x$ . Рентгенофазовый анализ показал, что образцы с  $x \geq 0,1$  были неоднородными, а образцы с  $x \geq 0,2$  кроме основной фазы со структурой магнетоплюмбита содержали примесные фазы  $\alpha-Fe_2O_3$ ,  $Gd_3Fe_5O_{12}$ . Установлено, что увеличение параметра  $x$  приводит к незначительному уменьшению температуры Кюри (от 727 К для  $SrFe_{12}O_{19}$  до 714 К для феррита с  $x = 0,5$ ). Установлено, что твердый раствор феррита  $Sr_{0,9}Gd_{0,1}Fe_{11,9}Zn_{0,1}O_{19}$  при 300 К имеет значения самопроизвольной намагниченности ( $n_0$ ) и коэрцитивной силы ( $H_c$ ) больше, чем у феррита с  $x = 0$  на 1,3 и 2,3% соответственно, а при значениях  $x > 0,1$  величины этих магнитных свойств постепенно уменьшаются.

High-coercivity ferrite samples  $Sr_{1-x}Gd_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  ( $x = 0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5$ ) with magnetoplumbite structure were prepared from oxides  $Fe_2O_3$ ,  $Gd_2O_3$ ,  $ZnO$  and carbonate  $SrCO_3$  by solid-state ceramic method, the dependence of the unit cell parameters  $a$  and  $c$  on the value of  $x$  was determined. XRD showed that the samples with  $x \geq 0.1$  were not single-phase, and the samples with  $x \geq 0.2$  contained not only bases phase with the structure of magnetoplumbite, but also the  $\alpha-Fe_2O_3$  and  $Gd_3Fe_5O_{12}$  phases. It was found that increase of the  $x$  value leads to a slight decrease in the Curie temperature (from 727 K for the basic ferrite  $SrFe_{12}O_{19}$  to 714 K for  $Sr_{1-x}Gd_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  solid solution with  $x = 0.5$ ). It has been found that at 300 K values of spontaneous magnetization ( $n_0$ ) and coercive force ( $H_c$ ) of solid solution  $Sr_{0,9}Gd_{0,1}Fe_{11,9}Zn_{0,1}O_{19}$  are respectively 1.3 and 2.3% higher than for the base ferrite  $SrFe_{12}O_{19}$ , and values of samples with  $x > 0.1$  of these magnetic properties decreases gradually.

**Введение.** Ферриты  $BaFe_{12}O_{19}$ ,  $SrFe_{12}O_{19}$  со структурой минерала магнетоплюмбита являются одноосными ферримагнетиками, имеют большую величину коэрцитивной силы ( $H_c$ ), хорошую химическую стабильность, низкую цену и широко используются для изготовления постоянных магнитов [1–3]. До конца прошлого века улучшение магнитных свойств постоянных магнитов из ферритов  $BaFe_{12}O_{19}$ ,  $SrFe_{12}O_{19}$  в основном достигалось за счет модификации технологии их изготовления. Проведение таких работ позволило поднять энергетическое производство  $(BH)_{max}$  анизотропных постоянных керамических магнитов до величины  $35 \text{ кДж/м}^3$ , но эта величина значительно меньше теоретически возможной. Очевидно, дальнейший прогресс в улучшении качества постоянных магнитов из ферритов бария и стронция можно ожидать не только за счет модификации технологии их получения (это направление почти исчерпано), но также и за счет целенаправленного, научно-обоснованного изменения состава твердых растворов на основе ферритов бария и стронция со структурой магнетоплюмбита. До настоящего времени перспективным направлением поиска

новых магнитотвердых материалов является изучение твердых растворов на основе  $SrFe_{12}O_{19}$ , в котором ионы  $Sr^{2+}$  частично замещены ионами редкоземельных элементов  $Ln^{3+}$  ( $Ln - La, Nd, Pr, Sm$ ), а эквивалентное количество ионов  $Fe^{3+}$  замещено ионами  $M^{2+}$  ( $M - Zn, Co, Mn$ ) [4–10]. В настоящей работе проведен синтез ферритов  $Sr_{1-x}Gd_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ ) со структурой магнетоплюмбита, изучены их кристаллическая структура, температура Кюри, намагниченность насыщения и коэрцитивная сила.

**Методика эксперимента.** Керамические образцы ферритов  $Sr_{1-x}Gd_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ ) синтезированы твердофазным методом из оксидов гадолиния ( $Gd_2O_3$ ), железа ( $Fe_2O_3$ ), цинка ( $ZnO$ ) и карбоната стронция ( $SrCO_3$ ). 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 таблетки диаметром 9 мм, высотой 2–3 мм и бруски размера  $5 \times 5 \times 30$  мм<sup>3</sup>, которые обжигали при 1473 К в течение 4 ч на воздухе.

Рентгеновские дифрактограммы образцов ферритов были записаны на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 (излучение  $\text{CuK}\alpha$ ) при комнатной температуре. Параметры кристаллической решетки были рассчитаны с помощью рентгеноструктурного табличного процессора RTP. Зависимости удельной намагниченности от температуры и величины магнитного поля ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  получены в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению. Удельную намагниченность ( $\sigma_{\text{уд}}$ ) порошков ферритов в магнитном поле 8,6 кЭ измеряли методом Фарадея в интервале температур 77–900 К. Удельная намагниченность насыщения и параметры петли гистерезиса удельной намагниченности образцов ферритов цилиндрической формы длиной 5,0–5,4 мм и диаметром 1–1,2 мм были измерены вибрационным методом в магнитном поле до 14 Тл при температурах 5 и 300 К.

**Результаты и их обсуждение** Анализ рентгеновских дифрактограмм (рис. 1) показал, что образец феррита  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  с  $x = 0$  был однофазным со структурой магнетоплюмбита; образцы с  $x \geq 0,1$ , кроме основной фазы со структурой магнетоплюмбита, содержали также фазу  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , количество которой постепенно увеличивалось при увеличении  $x$  до 0,5; в образцах с  $x \geq 0,2$  присутствовала фаза феррита гадолиния  $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ . В образцах с  $x \geq 0,3$  присутствовали фазы  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  и  $\text{GdFeO}_3$ ; в образцах с  $x = 0,4, 0,5$  – фаза  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . Можно было предположить, что присутствие в этих образцах примесных фаз обусловлено незавершенностью твердофазных реакций. В связи с этим неоднородные образцы ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  с  $x = 0,1, 0,2$  дробили, мололи, прессовали в таблетки и обжигали дополнительно на воздухе при 1473 К в течение 4 ч. Рентгенофазовый анализ этих дополнительно обожженных образцов показал, что в образце феррита  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  с  $x = 0,1$  содержание фазы  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  уменьшилось, но полностью она не исчезла. Дифрактограмма образца с  $x = 0,2$  практически не изменилась. Это показывает, что предельная величина степени замещения  $x$  ионов  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ионами  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  в феррите  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  при 1473 К чуть меньше 0,1. В табл. 1 приведены значения параметров кристаллической решетки  $a$ ,  $c$  и объема  $V$  элементарной

ячейки образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ . Видно, что увеличение степени замещения  $x$  от 0 до 0,1 приводит к уменьшению параметров кристаллической решетки  $a$  и  $c$  от величин 5,8838, 23,046 Å для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до 5,8818, 23,033 Å, а при дальнейшем увеличении степени замещения  $x$  до 0,5 параметры кристаллической решетки  $a$  и  $c$  изменяются без определенной закономерности.

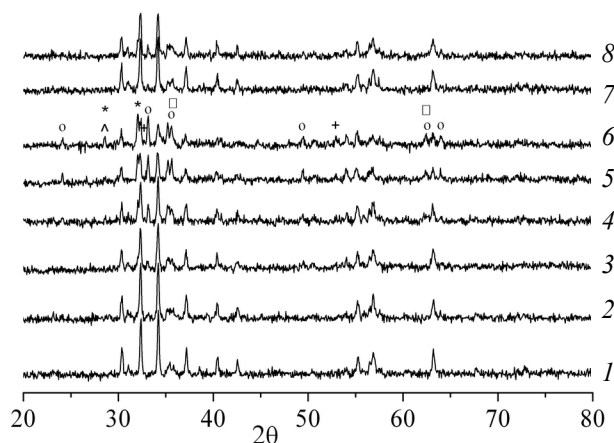


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ :  $x = 0$  (1); 0,1 (2); 0,2 (3); 0,3 (4); 0,4 (5); 0,5 (6), и образцов с  $x = 0,1$  (7); 0,2 (8), дополнительно обожженных при 1473 К:  
 o –  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , \* –  $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , + –  $\text{GdFeO}_3$ ,  
 □ –  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ , ^ –  $\text{Gd}_2\text{O}_3$

Таблица 1  
 Значения параметров  $a$ ,  $c$  и  $V$  кристаллической решетки ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  со структурой магнетоплюмбита

$x$	$a$ , Å	$c$ , Å	$V$ , Å <sup>3</sup>
0	5,8838	23,046	689,957
0,1	5,8818	23,033	690,059
0,2	5,8849	23,058	691,563
0,3	5,8837	23,053	691,121
0,4	5,8833	23,093	692,223
0,5	5,8831	23,092	692,161

Полученные в настоящей работе значения параметров кристаллической решетки  $a$ ,  $c$  и объема  $V$  для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  незначительно отличаются от литературных данных [11] для этого феррита ( $a = 5,8844$  Å,  $c = 23,05$  Å,  $V = 691,20$  Å<sup>3</sup>).

Фотографии поверхности скола образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ , полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-5610V (Япония), представлены на рис. 2. На фотографиях видно, что большинство кристаллитов (зерен) не имеют хорошей огранки и их размер составляет 1,5–4,0 мкм.

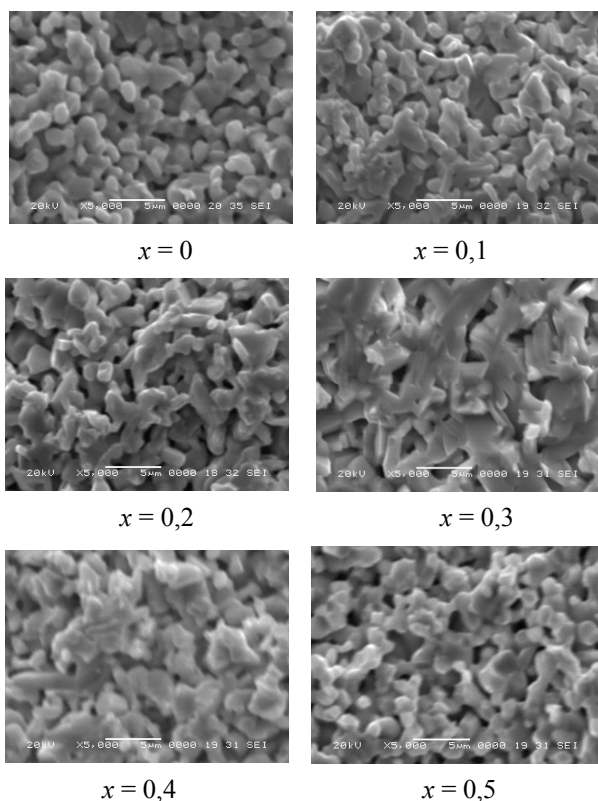


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки ферритов системы  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ , увеличение в 5000 раз

На рис. 3 для исследованных образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  приведены температурные зависимости удельной намагниченности ( $\sigma_{\text{уд}}$ ), измеренной методом Фарадея в магнитном поле 0,86 Тл в интервале температур 77–900 К, позволившие определить температуру Кюри ( $T_c$ ) этих ферритов, значения которой приведены в табл. 2.

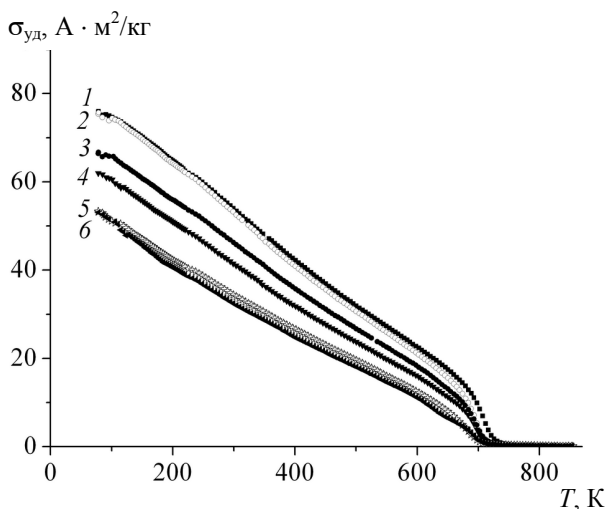


Рис. 3. Температурные зависимости удельной намагниченности  $\sigma_{\text{уд}}$  образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  при  $x$ :  
1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,3; 5 – 0,4; 6 – 0,5

Установлено, что увеличение параметра состава  $x$  образцов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  приводит к незначительному уменьшению температуры Кюри от 727 К для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до 714 К для феррита с  $x = 0,5$ .

На рис. 4 в качестве примера приведена петля гистерезиса намагниченности для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  при температуре 5 К. Видно, что намагниченность насыщения этого феррита достигается в полях около 3 Тл, выше которых происходит небольшое безгистерезисное возрастание намагничивания за счет парапроцесса.

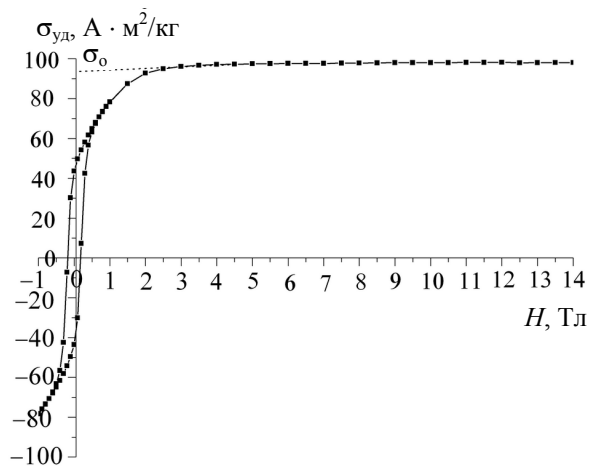


Рис. 4. Петля гистерезиса удельной намагниченности при температуре 5 К для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

Подобные петли магнитного гистерезиса удельной намагниченности при температурах 5 и 300 К в магнитных полях до 14 Тл получены и для других образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  ( $0 < x \leq 0,5$ ). Однако на рис. 5 для лучшей наглядности они приведены для магнитных полей лишь до 3 Тл, т. е. без участка линейной зависимости  $\sigma_{\text{уд}}$  от  $H$ , но которые в интервале магнитных полей 3–14 Тл присутствуют на всех экспериментально полученных петлях магнитного гистерезиса исследованных ферритов. Путем экстраполяции линейного участка зависимости  $\sigma_{\text{уд}}$  от  $H$  до  $H = 0$  Тл для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  (рис. 4) и для всех других исследованных ферритов при температурах 5 и 300 К определены значения удельной самопроизвольной намагниченности ( $\sigma_0$ ), значения которой приведены в табл. 2. Для образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  с  $x = 0; 0,1$  по формуле

$$n_o = \frac{\sigma_0 \cdot M}{5585},$$

где  $M$  – молярная масса соответствующего феррита, 5585 – величина, равная произведению величины магнетона Бора ( $\mu_B$ ) на число Авогад-

ро, рассчитаны значения самопроизвольной намагниченности ( $n_0$ ), выраженной в магнетонах Бора на одну формульную единицу феррита (табл. 2). За величину удельной намагниченности насыщения ( $\sigma_s$ ) соответствующего феррита принималась величина удельной намагниченности, измеренной в магнитном поле 3 Тл.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что величины  $\sigma_s$  для всех исследованных ферритов лишь незначительно меньше величин  $\sigma_0$ . Величины  $n_0$  одной формульной единицы феррита  $\text{Sr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_{19}$  при температурах 5 и 300 К соответственно больше, чем для базового феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  на 1,7 и 1,3%. Однако при дальнейшем увеличении степени замещения от 0,2 до 0,5 наблюдается уменьшение величины самопроизвольной намагниченности  $n_0$  и  $\sigma_s$ . Отметим, что твердый раствор феррита  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  с  $x = 0,1$  при 300 К имеет значения самопроизвольной намагниченности  $n_0$  и коэрцитивной силы  $\sigma H_c$  больше, чем у феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , на 1,3 и 2,3% соответственно. Такое увеличение при 300 К самопроизвольной намагниченности и коэрцитивной силы при замещении ионов  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ионами  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  в феррите  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до  $x = 0,1$  должно приводить к увеличению энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  постоянных магнитов при 300 К изготовления из твердого раствора  $\text{Sr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_{19}$ . Однако при увеличении  $x$  от 0,1 до 0,5 наблюдается постепенное уменьшение величин коэрцитивной силы  $\sigma H_c$  при температурах 5 и 300 К (табл. 2), и коэрцитивная сила  $\sigma H_c$  при 5 и 300 К для образца с  $x = 0,2$  меньше, чем для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ . При этом для всех исследованных ферритов повышение температуры от 5 до 300 К приводит к значительному увеличению коэрцитивной силы (табл. 2).

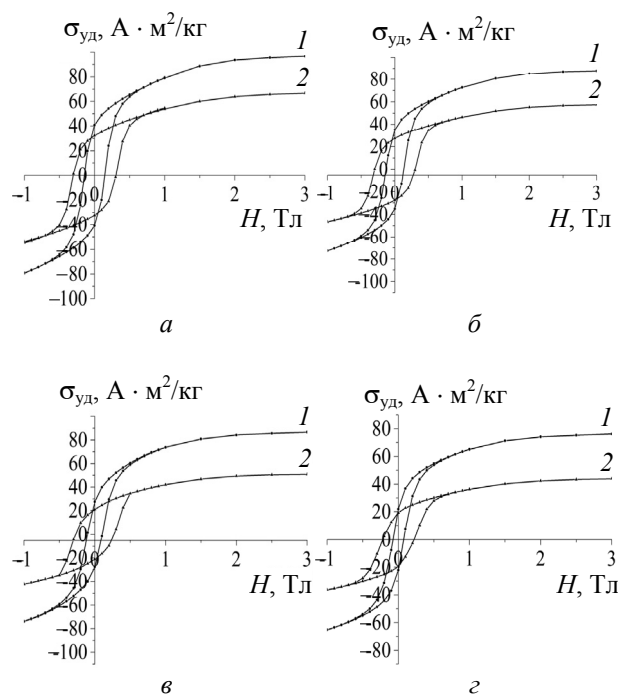


Рис. 5. Петли гистерезиса удельной намагниченности  $\sigma_{уд}$  при температурах 5 К (1) и 300 К (2) для  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  при  $x = 0,1$  (а),  $x = 0,2$  (б),  $x = 0,3$  (в),  $x = 0,4$  (г)

**Закключение.** Твердофазным методом получены образцы ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ ). Рентгенофазовый анализ показал, что образцы с  $x \geq 0,1$  были неоднородными. Образцы с  $x \geq 0,2$  кроме основной фазы твердых растворов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  со структурой магнетоплюмбита содержали примесные фазы  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ .

Установлено, что увеличение параметра состава  $x$  образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  приводит к незначительному уменьшению температуры Кюри от 727 К для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до 714 К для феррита с  $x = 0,5$ .

Таблица 2

Температура Кюри ( $T_c$ ), удельная самопроизвольная намагниченность ( $\sigma_0$ ), удельная намагниченность насыщения ( $\sigma_s$ ), самопроизвольная намагниченность одной формульной единицы ( $n_0$ ), удельная остаточная намагниченность ( $\sigma_r$ ), коэрцитивная сила ( $\sigma H_c$ ) образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  при 5 и 300 К

$x$	$T_c$ , К	$T = 5$ К					$T = 300$ К				
		$\sigma_0$ , $\text{A} \cdot \text{M}^2/\text{кг}$	$n_0$ , $\mu_B$	$\sigma_s$ , $\text{A} \cdot \text{M}^2/\text{кг}$	$\sigma_r$ , $\text{A} \cdot \text{M}^2/\text{кг}$	$\sigma H_c$ , кА/м	$n_0$ , $\mu_B$	$\sigma_s$ , $\text{A} \cdot \text{M}^2/\text{кг}$	$\sigma_r$ , $\text{A} \cdot \text{M}^2/\text{кг}$	$\sigma H_c$ , кА/м	
0	727	97,05	18,45	96,13	43,55	143,64	12,69	66,21	32,33	259,14	
0,1	718	97,95	18,76	96,71	42,44	118,02	12,85	67,08	32,97	265,21	
0,2	717	88,45	–	87,88	35,13	105,56	–	57,58	27,57	238,04	
0,3	716	86,62	–	86,61	27,62	83,11	–	50,54	21,12	214,46	
0,4	716	76,34	–	76,28	22,01	59,08	–	43,95	19,35	174,88	
0,5	714	74,71	–	74,53	16,35	53,99	–	42,27	18,82	174,26	

Установлено, что твердый раствор феррита  $\text{Sr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_{19}$  при 300 К имеет значения самопроизвольной намагниченности  $n_0$  и коэрцитивной силы  $H_c$  больше, чем у феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , на 1,3 и 2,3% соответственно. Такое увеличение при 300 К самопроизвольной намагниченности коэрцитивной силы твердого раствора  $\text{Sr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_{19}$  должно приводить к увеличению энергетического произведения  $(BH)_{\text{max}}$  постоянных магнитов изготовления из этого твердого раствора.

### Литература

1. Смит Я., Вейн Ч., Ферриты. Физические свойства и практическое применение. М., 1962. 504 с.
2. Технология производства материалов магнитоэлектроники / Л. М. Летюк [ и др.]. М.: Металлургия, 1994. 416 с.
3. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. В 3 т. М.: Мир, 1976. Т. 2. 504 с.
4. High Energy Ferrite Magnets / H. Taguchi [et al.] // 7<sup>th</sup> International Conference on Ferrites, Bordeaux, 3–6 september 1996 / Bordeaux Convention Center France. Bordeaux, 1996. P. 3–4.
5. Yamamoto H., Obara G. Magnetic properties of anisotropic sintered magnets using Sr–La–Co system powders by mechanical compounding

method // J. of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. 2000. Vol. 47. P. 796–800.

6. Substitution effects in M-type hexaferrite powders investigated by Mossbauer spectrometry / L. Lechevallier [et al.] // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. Vol. 290–291. Iss. 2. P. e1237–e1239.

7. 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.

8. 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.

9. Кристаллическая структура и магнитные свойства высококоэрцитивных твердых растворов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  / Д. Д. Польшко [и др.] // Неорганические материалы. 2011. Т. 47, № 1. С. 81–86.

10. Crystal structure and magnetic properties of  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  solid solutions / Wu Ze [et al.] // Inorganic Materials. 2014. Vol. 50, No. 3. P. 285–290.

11. Powder Diffraction File. Swarthmore: Joint Committee on Powder Diffraction Standard Card № 84–1531.

Поступила 03.03.2014