

## МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ФЕРРИТОВ $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$

У Цзэ<sup>1</sup>, Л.А. Башкиров<sup>2</sup>, С.В. Слонская<sup>2</sup>, С.В. Труханов<sup>3</sup>, Л.С. Лобановский<sup>3</sup>,  
А.И. Галяс<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет  
г. Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет  
г. Минск, Беларусь,

<sup>3</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению  
г. Минск, Беларусь,

Ферриты  $BaFe_{12}O_{19}$ ,  $SrFe_{12}O_{19}$  со структурой магнетоплюмбита являются одноосными ферримагнетиками, имеют большую величину коэрцитивной силы ( $H_c$ ) и широко используются для изготовления постоянных керамических магнитов и в различных устройствах техники СВЧ [1-3]. В работе [4] показано, 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 уменьшению намагниченности, но одновременно с этим происходит увеличение поля анизотропии, что позволяет из твердого раствора  $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$  изготавливать анизотропные постоянные магниты с величиной  $(BH)_{max} = 38.4$  кДж/м<sup>3</sup>.

Целью настоящей работы является получение ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  ( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ) со структурой магнетоплюмбита, изучение их намагниченности насыщения, остаточной намагниченности, коэрцитивной силы и электропроводности на постоянном токе.

Твердофазным методом на воздухе при 1473 К были получены образцы ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  ( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ). Удельная намагниченность и петли магнитного гистерезиса образцов ферритов были измерены вибрационным методом на универсальной высокополевой измерительной системе (Cryogenic Ltd London, 41S) в магнитном поле до 14 Тл при температурах 5 и 300 К.

Рентгенофазовый анализ показал, что образцы с  $x < 0.2$  были однофазными, а при  $0.2 \leq x \leq 0.4$ , кроме основной фазы со структурой магнетоплюмбита, содержали также фазу  $\alpha-Fe_2O_3$ , количество которой постепенно увеличивалось при повышении  $x$  до 0.4, и в образцах с  $0.3 \leq x \leq 0.4$  в небольшом количестве присутствовали также фазы  $SmFeO_3$ . Это показывает, что предельная величина степени замещения  $x$  ионов  $Sr^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ионами  $Sm^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$  в феррите  $SrFe_{12}O_{19}$  при 1473 К чуть равна 0.2.

Полученные для образцов ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  ( $0 \leq x \leq 0.4$ ) температурные зависимости удельной намагниченности ( $\sigma_{уд}$ ), измеренной методом Фарадея в магнитном поле 684.4 кА/м (0.86 Тл) в интервале температур 77–900 К, позволили определить температуру Кюри ( $T_c$ ) для этих ферритов, значения которой приведены в табл. 1. Установлено, что увеличение

параметра состава  $x$  образцов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  приводит к постепенному уменьшению температуры Кюри от 731 К для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до 717 К для образца с  $x = 0.4$ .

На рис. 1 в качестве примера приведены петли гистерезиса удельной намагниченности для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , измеренной при температурах 5 и 300 К в магнитных полях до 11140.8 кА/м (14 Тл). На рис. 1 видно, что намагниченность насыщения феррита стронция  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  достигается в полях около 2387.3 кА/м (3 Тл), выше которых происходит небольшое безгистерезисное возрастание намагниченности за счет парапроцесса. Подобные петли магнитного гистерезиса удельной намагниченности при температурах 5 и 300 К в магнитных полях до 14 Тл получены и для других образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  ( $0 < x \leq 0.4$ ). Однако на рис. 2 для лучшей наглядности они приведены в магнитных полях лишь до 2387.3 кА/м (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  $H = 0$  для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  (рис. 1) и для всех других исследованных ферритов при температурах 5 и 300 К определены значения удельной самопроизвольной намагниченности ( $\sigma_0$ ), значения которых приведены в табл. 1. Для однофазных образцов ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  с  $x = 0, 0.1, 0.2$  по формуле

$$n_0 = \frac{\sigma_0 \cdot M}{5585},$$

где  $M$  – молярная масса соответствующего феррита, 5585 – величина, равная произведению величины магнетона Бора ( $\mu_B$ ) на число Авогадро, рассчитаны значения самопроизвольной намагниченности ( $n_0$ ), выраженной в магнетонах Бора на одну формульную единицу феррита (табл. 1).

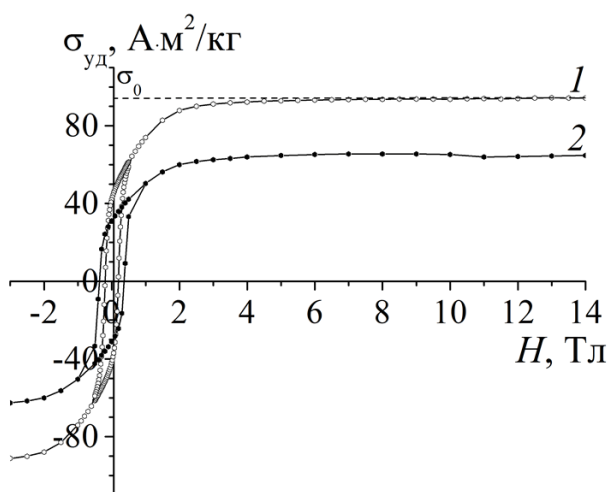


Рис. 1. Петли гистерезиса удельной намагниченности при температурах 5 К (1) и 300 К (2) для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

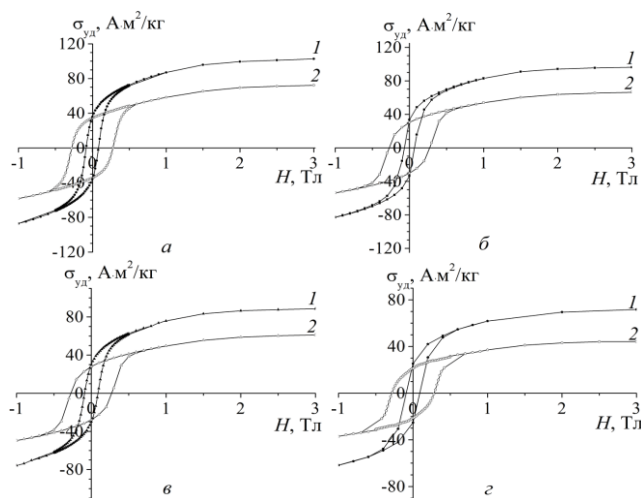


Рис. 2. Петли гистерезиса удельной намагниченности  $\sigma_{\text{уд}}$  при температурах 5 К (1) и 300 К (2) для  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  при  $x = 0.1$  (а), 0.2 (б), 0.3 (в), 0.4 (г)

За величину удельной намагниченности насыщения ( $\sigma_s$ ) соответствующего феррита принималась величина удельной намагниченности, измеренной в магнитном поле 3 Тл. Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что величины  $\sigma_s$  для ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  лишь незначительно меньше величин самопроизвольной намагниченности  $\sigma_o$ . Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что величины самопроизвольной намагниченности ( $n_o$ ) одной формульной единицы исследованных ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  со степенью замещения  $x = 0.1$  при температурах 5 и 300 К на 12.9 и 10.1% соответственно больше, чем для базового феррита  $SrFe_{12}O_{19}$ , а коэрцитивная сила  $\sigma H_c$  при 5 и 300 К для феррита с  $x=0.1$  на 57.2 и 23.3% соответственно меньше, чем для  $SrFe_{12}O_{19}$ .

Таблица 1. Температура Кюри ( $T_c$ ), удельная самопроизвольная намагниченность ( $\sigma_o$ ), удельная намагниченность насыщения ( $\sigma_s$ ), самопроизвольная намагниченность одной формульной единицы ( $n_o$ ), удельная остаточная намагниченность ( $\sigma_r$ ), коэрцитивная сила ( $\sigma H_c$ ) образцов ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  при 5 и 300 К

x	$T_c$ , К	$T = 5$ К					$T = 300$ К				
		$\sigma_o$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$n_o$ , μ <sub>B</sub>	$\sigma_s$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma_r$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma H_c$ , кА/м	$n_o$ , μ <sub>B</sub>	$\sigma_s$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma_r$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma H_c$ , кА/м	
0	731	92.78	17.63	91.81	41.99	155.24	12.63	62.56	31.12	289.31	
0.1	723	103.99	19.90	102.68	35.89	66.52	13.90	72.3	34.48	221.75	
0.2	721	96.64	18.62	96.21	33.48	53.71	12.96	66.31	30.32	216.50	
0.3	719	88.90		88.59	29.86	71.05		61.18	27.95	216.50	
0.4	717	73.06		71.71	25.3	71.93		44.14	21.32	225.81	

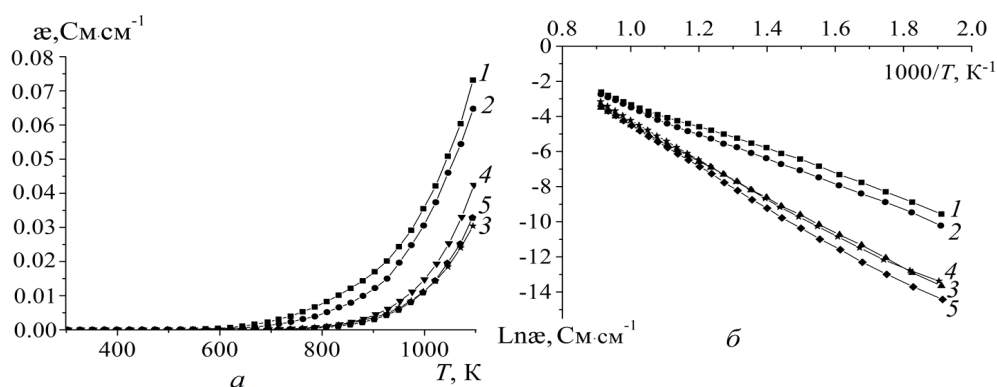


Рис. 3. Зависимости удельной электропроводности ( $\alpha$ ) от температуры  $T$  (а) и  $\ln \alpha$  от  $T^{-1}$  (б) ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  при  $x=0$  (1), 0.1 (2), 0.2 (3), 0.3 (4), 0.4 (5)

Приведенные на рис. 3 зависимости удельной электропроводности ( $\alpha$ ) от температуры  $T$  (а) и  $\ln \alpha$  от  $T^{-1}$  (б) для образцов ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Zn_xO_{19}$  показывают, что электропроводность всех исследованных образцов ферритов с повышением температуры увеличивается и является полупроводниковой. Для однофазных образцов повышение степени замещения  $x$  от 0 до 0.2 приводит

при одинаковых температурах к уменьшению удельной электропроводности. Так, например, удельная электропроводность при 900 К ( $\alpha_{900}$ ) для образцов ферритов с  $x = 0, 0.1, 0.2$  равна  $17.0 \cdot 10^{-3}, 12.2 \cdot 10^{-3}, 3.7 \cdot 10^{-3}$  См·см<sup>-1</sup>. В области составов с  $x = 0.3, 0.4$  удельная электропроводность изменяется незначительно и при 900 К она равна  $4.5 \cdot 10^{-3}, 3.1 \cdot 10^{-3}$  См·см<sup>-1</sup> соответственно. Для всех исследованных ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  на прямолинейных зависимостях  $\ln \alpha$  от  $T^{-1}$  (рис. 3, б) наблюдается излом при температуре  $T_{\text{изл}}$ , как и в системе  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  [5].

Таблица 2. Энергия активации электропроводности ниже ( $E_{A1}$ ) и выше ( $E_{A2}$ ) температуры  $T_{\text{изл}}$ , величина  $\Delta E = E_{A2} - E_{A1}$  для ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$

x	$T_{\text{изл}}$ , К	$E_{A1}$ , эВ	$E_{A2}$ , эВ	$\Delta E$ , эВ
0	860	0.54	0.59	0.05
0.1	920	0.60	0.74	0.14
0.2	860	0.86	0.93	0.07
0.3	750	0.90	0.99	0.09
0.4	840	0.99	1.04	0.05

Полученные результаты (табл. 2) показывают, что увеличение степени замещения  $x$  ионов  $\text{Sr}^{2+}$  в феррите  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  ионами  $\text{Sm}^{3+}$  и ионов  $\text{Fe}^{3+}$  ионами  $\text{Zn}^{2+}$  от 0 до 0.4 приводит к повышению энергии активации электропроводности  $E_{A1}$ ,  $E_{A2}$  от значений 0.54, 0.59 эВ соответственно для феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до величин 0.99, 1.04 эВ для твердого раствора  $\text{Sr}_{0.6}\text{Sm}_{0.4}\text{Fe}_{11.6}\text{Zn}_{0.4}\text{O}_{19}$ . Разница между  $E_{A2}$  и  $E_{A1}$  ( $\Delta E = E_{A2} - E_{A1}$ ) при увеличении  $x$  изменяется незначительно: от 0.05 эВ для  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  до 0.14, 0.07 эВ для твердых растворов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  с  $x = 0.1, 0.2$  соответственно.

### Литература

1. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. Физические свойства и практическое применение. М.: ИЛ, 1962. 504 с.
2. Летюк Л.М., Балбашов А.М., Круточин Д.Г. и др. Технология производства материалов магнитоэлектроники. М.: Металлургия, 1994. 415 с.
3. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. М.: Мир, 1976. Т. 2. 504 с.
4. Taguchi H., Takeishi T., Suwa K. et al. High Energy Ferrite Magnets // J. Physique IV: JP. 1997. V. 7. № 1. P. C1-311–C1-312.
5. Башкиров Л. А., Дудчик Г.П., Крисько Л.Я. и др. Кристаллическая структура, магнитные и электрические свойства ферритов  $\text{Sr}_{0.75-3x/4}\text{Ca}_{0.25-x/4}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  // Свиридовские чтения. Минск: БГУ. 2008. С. 100–106.