

УДК 538.62

В.А. ЖУРАВЛЕВ, Е.П. НАЙДЕН, А.С. ШЕСТАКОВ

### МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ГЕКСАФЕРРИТОВ СИСТЕМЫ $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВС

Методом ферромагнитного резонанса исследована магнитная анизотропия однодоменных частиц гексаферритов системы  $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ . Показано, что при интерпретации спектров ФМР необходимо учитывать кроме магнитной анизотропии еще и анизотропию магнитомеханического отношения.

**Ключевые слова:** гексаферриты, ферромагнитный резонанс, магнитокристаллическая анизотропия.

Одноосные оксидные ферритмагнетики с гексагональной кристаллической структурой – гексаферриты бария –  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  (Ba–M) и стронция –  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  (Sr–M) с большой величиной поля магнитокристаллической анизотропии (МКА), большой намагниченностью насыщения являются перспективными материалами для использования их в различных устройствах СВЧ- и КВЧ-диапазонов, например в качестве наполнителей в радиопоглощающих материалах и покрытиях [1, 2]. Замещение части ионов железа  $\text{Fe}^{3+}$  комплексом  $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$  в этих гексаферритах существенно уменьшает величину поля магнитокристаллической анизотропии и сдвигает частоту естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) и соответственно полосу частот поглощения в низкочастотную часть СВЧ-диапазона длин волн [3, 4].

В данной работе методом ферромагнитного резонанса (ФМР) проведено исследование магнитной анизотропии однодоменных порошковых образцов гексаферритов системы  $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$  ( $0 \leq x \leq 1,0$ ). Образцы получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с предварительной механической активацией исходных реагентов. После проведения СВС для улучшения фазового состава, уменьшения микроупругих напряжений и увеличения размеров зерен проводилась двухэтапная ферритизация порошков при температурах 1200 и 1250 °С в течение 2 ч. Содержание основной М-фазы после ферритизации стало более 90 %, размер областей когерентного рассеяния  $\geq 1$  мкм у всех синтезированных материалов.

Кривые ФМР снимались в диапазоне частот 26–52 ГГц при комнатной температуре. Обработка спектров проводилась по методике, описанной в [5]. Она основана на том, что на резонансных кривых порошковых образцов наблюдается несколько особенностей – максимумов или ступенек. Низкополевая особенность соответствует резонансу кристаллитов, у которых направление намагничивающего поля  $H$  близко к оси легкого намагничивания (ОЛН). Высокополевая особенность соответствует резонансу кристаллитов, у которых намагничивающее поле ориентировано вблизи направлений трудного намагничивания. В рассматриваемом нами диапазоне концентраций  $x$  ОЛН направлена вдоль гексагональной оси  $c$  кристаллита, а направления трудного намагничивания расположены в базисной плоскости, которая является плоскостью трудного намагничивания (ПТН). Величины резонансных полей (частот) для этих направлений определяются формулами [5]

$$\omega_{\parallel} = \gamma_{\parallel} \left[ H + \frac{\gamma_{\perp}}{\gamma_{\parallel}} H'_{a1} \right], \quad \omega_{\perp} = \gamma_{\perp} \left[ H \left( H - H'_0 \right) \right]^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь  $\omega_{\parallel}$ ,  $\gamma_{\parallel}$  и  $\omega_{\perp}$ ,  $\gamma_{\perp}$  – резонансные частоты и магнитомеханические отношения для направлений вдоль гексагональной оси и в базисной плоскости соответственно;  $H'_{a1}$ ,  $H'_0$  – поля магнитной анизотропии для этих направлений. Эти поля включают вклады от магнитокристаллической анизотропии и анизотропии формы кристаллитов.

Отметим, что формулы получены для монокристаллического образца гексаферрита в форме эллипсоида вращения с осью, параллельной гексагональной оси  $c$ . Величины резонансных полей (или частот) имеющих на кривых ФМР порошковых образцов особенностей – максимумов и ступенек – будут совпадать с рассчитанными по этим формулам только в случае пренебрежимо малой диссипации [6]. Поэтому при аппроксимации экспериментальных данных формулами (1) нами по углу наклона зависимостей  $\omega(H)$  проведены оценки только величин магнитомеханических отношений  $\gamma_{\parallel}$  и  $\gamma_{\perp}$ . Результаты представлены в табл. 1. Согласно табл. 1, замещение части ионов железа комплексом  $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$  приводит к появлению заметной анизотропии магнитомехани-

ческого отношения  $\Delta\gamma$ , причем она немонотонно зависит от концентрации, достигая максимума вблизи  $x = 0,7$ .

Таблица 1  
Магнитомеханические отношения гексаферритов системы  $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_{1-x})\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$

Концентрация, $x$	$\gamma_{\parallel}$ , ГГц/кЭ	$\gamma_{\perp}$ , ГГц/кЭ	$\Delta\gamma = \gamma_{\perp} - \gamma_{\parallel}$ , ГГц/кЭ	$\omega_r / 2\pi$ , ГГц
0,0	$2,9 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,2$	$0,0 \pm 0,3$	$44 \pm 4$
0,5	$2,75 \pm 0,08$	$2,70 \pm 0,06$	$0,0 \pm 0,1$	$37 \pm 2$
0,6	$2,59 \pm 0,08$	$2,87 \pm 0,06$	$0,3 \pm 0,1$	$35 \pm 2$
0,7	$2,54 \pm 0,07$	$3,00 \pm 0,08$	$0,5 \pm 0,2$	$31 \pm 2$
0,8	$2,51 \pm 0,04$	$2,94 \pm 0,05$	$0,43 \pm 0,09$	$28 \pm 1$
0,9	$2,59 \pm 0,03$	$2,85 \pm 0,04$	$0,26 \pm 0,07$	$23 \pm 1$
1,0	$2,51 \pm 0,04$	$2,72 \pm 0,03$	$0,21 \pm 0,07$	$19 \pm 1$

Экстраполяция экспериментальных данных ветви  $\omega_{\parallel}$  спектра ФМР на нулевые намагничивающие поля дает возможность оценить величины частот ЕФМР  $\omega_{\parallel}(H=0) = \gamma_{\parallel} H'_{a1}$  исследованных материалов. Результаты представлены в последней колонке табл. 1. Видно, что увеличение концентрации ионов комплекса  $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$  от нуля до единицы приводит к уменьшению частоты ЕФМР более чем в 2 раза.

Величины полей анизотропии  $H'_{a1}$ ,  $H'_\theta$  оценивались путем детального сопоставления формы экспериментальной и рассчитанной кривых ФМР [5]. Результаты оценок величины  $H'_{a1}$  представлены во второй строке табл. 2. Погрешность определения полей  $\pm 0,2$  кЭ.

Таблица 2  
Поля анизотропии гексаферритов системы  $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_{1-x})\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$

$x$	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$H_a$ , кЭ	18,8	17,1	16,2	15,0	13,0	11,5	10,3
$H'_{a1}$ , кЭ	16,4	15,2	13,5	12,3	10,5	9,7	8,4
$H_{a2} + H_{a3}$ , кЭ	–	–	–	–	0	–1,2	–2,4

В первой строке приведены величины полей анизотропии для этих материалов, определенные из анализа кривых намагничивания. Видно, что статические измерения дают большие величины полей анизотропии для всех исследованных составов. Это может быть связано как с различиями методик измерения (например, разные вклады от размагничивающих полей зерен и образца в суммарное поле магнитной анизотропии), так и с особенностями ФМР в материалах с анизотропным гиромангнитным отношением. Из опыта по ФМР в таких материалах определяется анизотропия не магнитного, а механического момента. В последней строке табл. 2 представлены концентрационные зависимости вклада от высших констант анизотропии, полученные по формуле  $H_{a2} + H_{a3} = H'_\theta - H'_{a1}$ . Роль констант анизотропии второго и третьего порядков возрастает с увеличением содержания ионов комплекса  $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смит Дж., Вейн Х. Ферриты. – М.: ИЛ, 1958. – 504 с.
2. Wartenberg В. // Z. Angew. Phys. – 1968. – V. 24. – P. 211.
3. Severin H. and Stoll J.P. // Z. Angew. Phys. – 1967. – V. 23. – No. 3. – P. 209.
4. Han-Shin Cho and Sung-Soo Kim // IEEE Magn. – 1999. – V. 35. – P. 3151.
5. Журавлев В. А. // ФТТ. – 1999. – Т. 41. – № 6. – С. 1050.
6. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука, 1973. – 591 с.

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: ptica@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.06.12.

Журавлев Виктор Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент;  
Найден Евгений Петрович, д.ф.-м.н., профессор;  
Шестаков Анатолий Сергеевич, магистрант.