

УДК 538.62, 548:537.611.46

*Е.П. НАЙДЕН**, *В.А. ЖУРАВЛЕВ**, *В.И. ИТИН***, *Р.В. МИНИН***, *В.И. СУСЛЯЕВ**, *О.А. ДОЦЕНКО**

**СТРУКТУРА, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА
СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА ГЕКСАФЕРРИТОВ
СИСТЕМЫ $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ ¹**

Предлагается ресурсосберегающая технология синтеза порошковых гексаферритов системы $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$. Определены величины намагниченности насыщения и поля анизотропии синтезированных материалов. Показано, что при интерпретации спектров ферромагнитного резонанса (ФМР) необходимо учитывать кроме магнитной анизотропии еще и анизотропию магнитомеханического отношения.

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

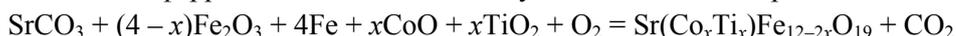
Материалы на основе оксидных ферримагнетиков (ферритов) находят широкое применение в различных областях науки и техники, в радиоэлектронике, электротехнике, приборостроении и т.д. Среди ферритов различного назначения большой интерес представляют оксидные ферримагнетики с гексагональной структурой, в частности гексаферрит стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (Sr-M), обладающий большой величиной поля магнитокристаллической анизотропии (МКА), высокой намагниченностью и высокой стабильностью этих характеристик в широком температурном интервале [1, 2]. Этот ферримагнетик и диамагнитно разбавленные системы на его основе широко используются как активные компоненты радиопоглощающих материалов и устройств СВЧ-диапазона. При этом максимальное поглощение энергии электромагнитного излучения у них происходит в области частот естественного ферромагнитного резонанса, которая определяется величиной поля анизотропии и микроструктурой материала – размером и формой зерен. Известно, что одним из основных способов улучшения структурных и магнитных свойств ферритов является введение в основной состав различного рода добавок, которые приводят к формированию замещенных структур. Для гексаферрита стронция замещение части ионов железа Fe^{3+} комплексом $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$ приводит к значительному уменьшению величины поля магнитной кристаллографической анизотропии и сдвигу частоты естественного ферромагнитного резонанса и соответственно полосы рабочих частот эффективного поглощения в низкочастотную часть СВЧ-диапазона длин волн [3, 4].

В последние десятилетия разработаны новые прогрессивные ресурсосберегающие способы получения ферритов, в основе которых лежит самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), протекающий в режиме фильтрационного горения порошков железа и оксидов других элементов в атмосфере реагирующих газов: кислорода или воздуха [5, 6].

Цель настоящей работы состоит в получении методом СВС М-фазы гексаферритов стронция $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ ($0 \leq x \leq 1,0$) и анализе их статических и динамических магнитных свойств. На всех стадиях синтеза проводилось исследование фазового состава и структурных параметров.

Синтез и рентгенографические исследования порошков

Для синтеза гексаферритов использовали следующие химические реакции:



и реактивы: стронций углекислый, оксид железа Fe_2O_3 , оксид кобальта CoO , оксид титана TiO_2 , железо радиотехническое марки Р10.

Для увеличения степени химического превращения при протекании СВС-процесса проводили предварительную механохимическую активацию (МХА) смеси порошков реагентов в планетарной мельнице МПВ с водяным охлаждением. Отношение массы шаров к массе реакционной смеси составляло 20:1, что соответствует энергонапряженности порядка 60 г. Активированная смесь реагентов с пористостью 60–70 % помещалась в реактор и воспламенялась. После окончания процес-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-98010-р_сибирь_а.

са СВС проводили ферритизацию в муфельной печи при температуре 1200–1250 °С в течение 2 ч в воздушной атмосфере.

Фазовый состав и структурные параметры продуктов СВС определяли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000 на $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Данные рентгеноструктурного анализа обработаны с использованием программы POWDER CELL 2.5. Установлены фазовый состав, размеры областей когерентного рассеяния (ОКР), оценены величины внутренних упругих микронапряжений, пропорциональные относительным изменениям межплоскостных расстояний ($\Delta d/d$).

Магнитные измерения включали в себя исследование кривых намагничивания в импульсных полях и спектров ферромагнитного резонанса (ФМР) в диапазоне частот 26–53 ГГц. Для исследования ФМР порошки гексаферрита стронция помещали в кварцевые трубки с внутренним диаметром 0,7 мм и длиной 10 мм. Плотность порошковых образцов была одинаковой и составляла 2,86 г/см³. Спектры магнитной и диэлектрической проницаемости измерялись в диапазоне частот 3–12 ГГц с помощью «Универсального широкополосного спектрометра на основе векторного анализатора цепей фирмы “Agilent Technologies”». Измерения производились резонаторным методом, в качестве измерительных ячеек использовался набор объемных прямоугольных резонаторов. Образцы исследуемых порошков гексаферритов помещались в кварцевую трубку с внутренним диаметром 2 мм. Плотность образцов контролировалась взвешиванием на электронных весах Shimadzu AUX320.

Результаты исследований продуктов СВС-методом рентгеноструктурного анализа представлены в табл. 1 и 2. Предварительная механохимическая активация исходных смесей приводит к заметному повышению концентрации основной фазы Sr–M до 75–87 об. % после проведения СВС. Без МХА содержание основной фазы после СВС составляло 60–70 об. %. Средний размер кристаллитов не превышает 100 нм для всех составов. Кроме основной фазы присутствуют наноразмерные фазы магнетита и оксида железа $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Их содержание составляет 13–25 об. %. Последующая ферритизация на воздухе при температуре 1200 °С в течение 2 ч приводит к росту содержания основной фазы Sr–M до 91–96 об. %, концентрация $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ при этом уменьшается до 4–9 об. %, следы магнетита в конечном продукте отсутствуют (табл. 1). Размеры частиц увеличиваются незначительно. Прочерки в графах таблицы означают, что данный параметр не оценивался.

Таблица 1

Фазовый состав и параметры структуры продуктов в системе $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$, обработанной по режиму МХА 3 мин + СВС + ферритизация при 1200 °С, 2 ч

Состав	Sr–M, об. %	ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^3$	Fe_2O_3 , об. %	ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^3$
SrFeO_{19}	96	120	0,30	4	–	–
$\text{SrCo}_{0,5}\text{Ti}_{0,5}\text{Fe}_{11}\text{O}_{19}$	94	60	0,15	6	–	–
$\text{SrCo}_{0,6}\text{Ti}_{0,6}\text{Fe}_{10,8}\text{O}_{19}$	94	100	0,60	6	–	–
$\text{SrCo}_{0,7}\text{Ti}_{0,7}\text{Fe}_{10,6}\text{O}_{19}$	94	63	1,10	6	–	–
$\text{SrCo}_{0,8}\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{10,4}\text{O}_{19}$	92	72	0,30	8	21	3,5
$\text{SrCo}_{0,9}\text{Ti}_{0,9}\text{Fe}_{10,2}\text{O}_{19}$	91	93	0,70	9	–	–
$\text{SrCo}_{1,0}\text{Ti}_{1,0}\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$	85	85	0,70	15	103	1,0

Для увеличения среднего размера частиц была проведена дополнительная ферритизация при температуре 1250 °С в течение 2 ч. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Фазовый состав и параметры структуры продуктов в системе $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$, обработанной по режиму: МХА 3 мин + СВС + ферритизация при 1200 °С, 2 ч + ферритизация при 1250 °С, 2 ч

Состав	Sr–M, об. %	ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^3$	Fe_2O_3 , об. %	ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^3$
SrFeO_{19}	99	≥ 1000	–	1	–	–
$\text{SrCo}_{0,5}\text{Ti}_{0,5}\text{Fe}_{11}\text{O}_{19}$	95	≥ 1000	–	5	–	–
$\text{SrCo}_{0,6}\text{Ti}_{0,6}\text{Fe}_{10,8}\text{O}_{19}$	95	≥ 1000	–	5	30	2,2
$\text{SrCo}_{0,7}\text{Ti}_{0,7}\text{Fe}_{10,6}\text{O}_{19}$	96	≥ 1000	–	4	–	–
$\text{SrCo}_{0,8}\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{10,4}\text{O}_{19}$	95	≥ 1000	–	5	–	–
$\text{SrCo}_{0,9}\text{Ti}_{0,9}\text{Fe}_{10,2}\text{O}_{19}$	91	≥ 1000	–	9	–	–
$\text{SrCo}_{1,0}\text{Ti}_{1,0}\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$	88	≥ 1000	–	12	–	–

Согласно табл. 2, дополнительная ферритизация повышает содержание основной фазы Sr–M, содержание фазы α -Fe₂O₃ при этом снижается. Размеры частиц существенно возрастают до значений более 1 мкм, а упругие микронапряжения резко уменьшаются.

Таким образом, после двухстадийной ферритизации получены однодоменные частицы гексаферритов системы Sr(Co_xTi_x)Fe_{12-2x}O₁₉ с однородным распределением по размерам.

Исследование кривых намагничивания

Исследование полевых зависимостей намагниченности и ее второй производной порошков гексаферрита стронция М-типа, допированного комплексом Co²⁺Ti⁴⁺, проведено на импульсном магнитометре в полях до 50 кЭ при комнатной температуре. Результаты измерений удельной намагниченности (σ) и величины полей анизотропии (H_a) синтезированных материалов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Удельная намагниченность и поля анизотропии гексаферритов системы Sr(Co_xTi_x)Fe_{12-2x}O₁₉

Концентрация, x	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
M_s , Гс·см ³ /Г	76,4	74,2	73,8	73,3	72,3	71,6	68,9
H_a , кЭ	18,8	17,1	16,2	15,0	13,0	11,5	10,3

Отметим, что величины намагниченности и поля анизотропии для ферритов стронция, в том числе и замещенных, близки к литературным данным для монокристаллов [7] и порошковых образцов, полученных по традиционной керамической технологии [8].

На рис. 1 и 2 показаны температурные зависимости основных магнитных характеристик стронциевого гексаферрита с концентрацией ионов комплекса Co²⁺Ti⁴⁺ равной 1,0.

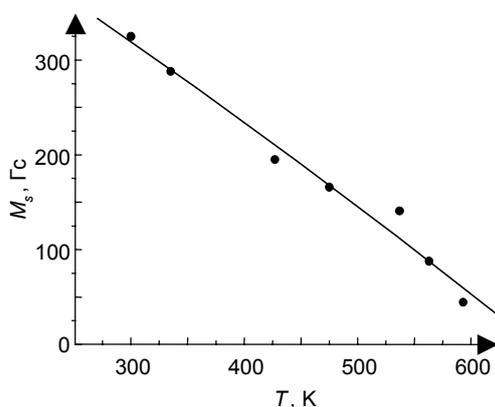


Рис. 1. Температурная зависимость намагниченности насыщения гексаферрита SrCo_{1,0}Ti_{1,0}Fe₁₀O₁₉

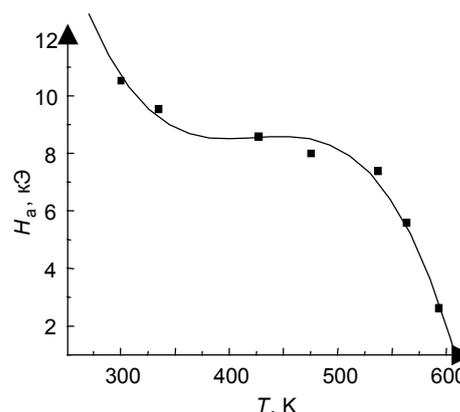


Рис. 2. Температурная зависимость поля анизотропии гексаферрита SrCo_{1,0}Ti_{1,0}Fe₁₀O₁₉

Видно, что намагниченность насыщения гексаферрита данного состава практически линейно уменьшается с увеличением температуры. На температурной зависимости поля анизотропии имеется область температур от 300 до 500 К, в которой поле анизотропии слабо зависит от температуры, т.е. данный ферритмагнетик является перспективным материалом для создания на его основе термостабильных радиопоглощающих устройств и покрытий на диапазон частот \approx 20–30 ГГц.

Исследование магнитной анизотропии наноструктурных порошков гексаферритов системы Sr(Co_xTi_x)Fe_{12-2x}O₁₉ методом ФМР

На рис. 3 представлены кривые ферромагнитного резонанса I порошков гексаферритов состава SrCoTiFe₁₀O₁₉. Цифры у кривых – частоты измерений в ГГц. Они имеют вид, типичный для порошков с анизотропией типа ось легкого намагничивания (ОЛН). Обработка спектров проводилась по методике, описанной в [9].

На резонансных кривых порошковых образцов наблюдается несколько особенностей – максимумов или ступенек. Низкополевая особенность соответствует резонансу кристаллитов, у которых направление намагничивающего поля H близко к ОЛН. Высокополевая особенность соответ-

ствует 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 [9]

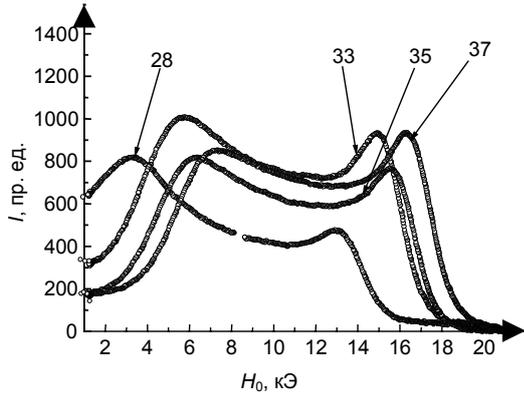


Рис. 3. Резонансные кривые порошка гексаферрита $\text{SrCo}_{1.0}\text{Ti}_{1.0}\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$

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

Здесь ω_{\parallel} , γ_{\parallel} и ω_{\perp} , γ_{\perp} – резонансные частоты и магнитомеханические отношения для направлений вдоль гексагональной оси и в базисной плоскости соответственно; H'_{a1} , H'_{θ} – поля магнитной анизотропии для данных направлений. Эти поля включают вклады от магнитокристаллической анизотропии и анизотропии

формы кристаллитов. С уменьшением частоты максимумы на кривых ФМР смещаются в сторону меньших полей. Рост потерь в нулевых полях с уменьшением частоты обусловлен приближением частоты СВЧ-поля к частоте естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), определяемой формулой

$$\omega_{\text{ЕФМР}} = \gamma_{\perp} H'_{a1}. \quad (2)$$

При уменьшении содержания комплекса $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$, начиная с $x = 0,8$, на спектрах ФМР в определенном диапазоне частот, зависящем от величины x , появляется дополнительный максимум, поведение которого кардинально отличается от расчета по формулам (1).

Это иллюстрируется рис. 4, где приведены резонансные кривые материала с $x = 0,7$. Частота 33 ГГц близка к частоте ЕФМР (2). На более высоких частотах поведение спектров ЕФМР обычное, как на рис. 3. При уменьшении частоты на склоне резонансных кривых появляется дополнительный максимум, который смещается в сторону больших полей, приближаясь к высокополевому максимуму. Этот тип колебаний, согласно [10], наблюдается в однодоменных частицах с анизотропией типа ОЛН при ориентации намагничивающего поля в ПТН и величинах $H_0 \leq H'_{\theta}$. При этом вектор намагниченности смещается из ПТН ($\theta_0 = \pi/2$) к ОЛН ($\theta_0 = 0$). Равновесная ориентация вектора намагниченности (угол θ_0) и резонансная частота этого типа колебаний (ω_3) определяются формулами

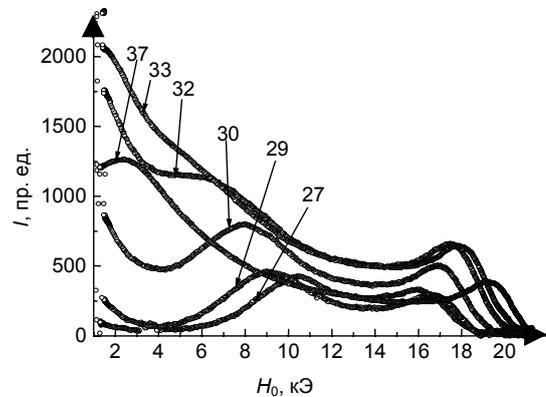


Рис. 4. Резонансные кривые порошка гексаферрита $\text{SrCo}_{0.7}\text{Ti}_{0.7}\text{Fe}_{10.6}\text{O}_{19}$

$$\theta_0 = \arcsin(H_0 / H'_{a1}), \quad \omega_3 = \gamma_{\perp} \left[(H'_{a1})^2 - H_0^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

полученными в предположении, что существенную роль в энергии магнитокристаллической анизотропии играет только первая константа анизотропии k_1 . На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости резонансных частот нескольких исследованных нами материалов. Цифрой 1 на рисунках обозначена ветвь спектра для кристаллитов, резонирующих вблизи частоты ω_{\parallel} (ОЛН), цифрой 2 – ω_{\perp} (ПТН), цифрой 3 – ω_3 . С увеличением концентрации ионов комплекса $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$ происходит сближение ветвей 1 и 2, точка пересечения ветви 1 с осью ординат, соответствующая частоте $\omega_{\text{ЕФМР}}$, и ветвь 3 смещаются в сторону меньших частот. Такое поведение обусловлено уменьшением величины поля анизотропии.

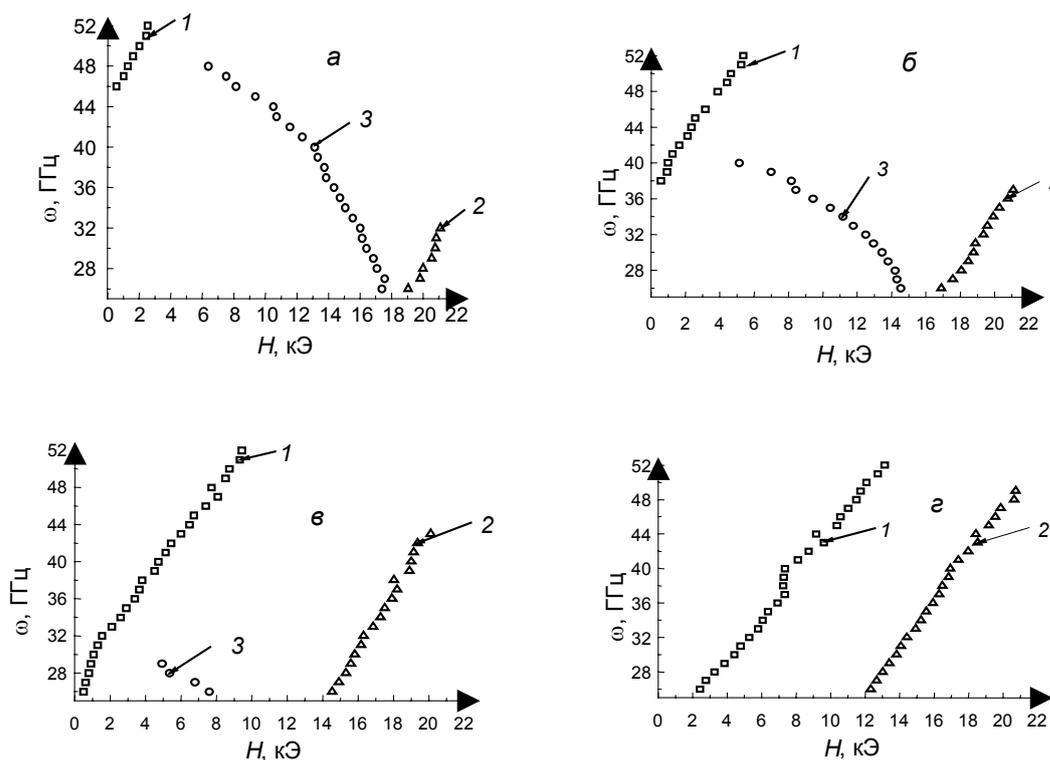


Рис. 5. Спектры ФМР исследованных образцов: *a* – концентрация $x = 0,0$; *б* – $x = 0,5$; *в* – $x = 0,8$; *г* – $x = 1,0$. Пояснения в тексте

Отметим, что формулы (1) – (3) получены для монокристаллического образца гексаферрита в форме эллипсоида вращения с осью, параллельной гексагональной оси c . Величины резонансных полей (или частот) имеющихся на кривых ФМР порошковых образцов особенностей – максимумов и ступенек – будут совпадать с рассчитанными по этим формулам только в случае пренебрежимо малой диссипации [10]. Поэтому при аппроксимации экспериментальных зависимостей ветвей 1 и 2 формулами (1) по углу наклона зависимостей $\omega(H)$ проведены оценки только величин магнитомеханических отношений γ_{\parallel} и γ_{\perp} . Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4
Магнитомеханические отношения гексаферритов системы $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$

Концентрация, x	γ_{\parallel} , ГГц/кЭ	γ_{\perp} , ГГц/кЭ	$\Delta\gamma = \gamma_{\perp} - \gamma_{\parallel}$, ГГц/кЭ	$\omega_{\text{ЕФМР}} / 2\pi$, ГГц
0,0	$2,90 \pm 0,10$	$2,90 \pm 0,20$	$0,00 \pm 0,30$	44 ± 4
0,5	$2,75 \pm 0,08$	$2,70 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,10$	37 ± 2
0,6	$2,59 \pm 0,08$	$2,87 \pm 0,06$	$0,30 \pm 0,10$	35 ± 2
0,7	$2,54 \pm 0,07$	$3,00 \pm 0,08$	$0,50 \pm 0,20$	31 ± 2
0,8	$2,51 \pm 0,04$	$2,94 \pm 0,05$	$0,43 \pm 0,09$	28 ± 1
0,9	$2,59 \pm 0,03$	$2,85 \pm 0,04$	$0,26 \pm 0,07$	23 ± 1
1,0	$2,51 \pm 0,04$	$2,72 \pm 0,03$	$0,21 \pm 0,07$	19 ± 1

Согласно табл. 4, замещение части ионов железа комплексом $\text{Co}^{2+}\text{Tl}^{4+}$ приводит к появлению заметной анизотропии магнитомеханического отношения $\Delta\gamma$, причем она немонотонно зависит от концентрации, достигая максимума вблизи $x = 0,7$ (рис. 6). Экстраполяция экспериментальных данных ветви ω_{\parallel} спектра ФМР на нулевые намагничивающие поля дает возможность оценить величины частот ЕФМР $\omega_{\text{ЕФМР}}$ исследованных материалов. Результаты представлены в последней колонке табл. 4. Видно, что увеличение концентрации ионов комплекса $\text{Co}^{2+}\text{Tl}^{4+}$ от нуля до единицы приводит к уменьшению частоты ЕФМР более чем в 2 раза.

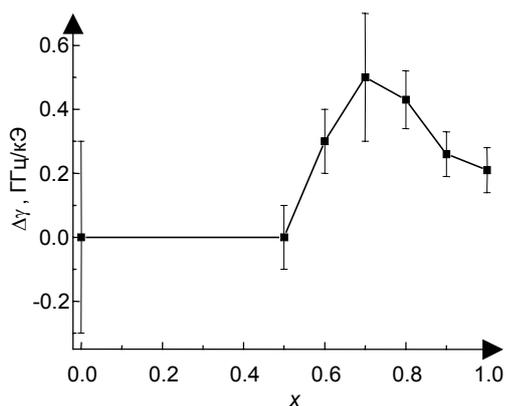


Рис. 6. Концентрационная зависимость анизотропии магнитомеханического отношения $\Delta\gamma = \gamma_{\perp} - \gamma_{\parallel}$ гексаферритов системы $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$

Величины полей анизотропии H'_{a1} , H'_0 оценивались путем детального сопоставления формы экспериментальных и рассчитанных кривых ФМР [9]. Результаты оценок представлены в табл. 5. В последней строке таблицы помещены концентрационные зависимости вклада от высших констант анизотропии, полученные по формуле $H_{a2} + H_{a3} = H'_0 - H'_{a1}$. Погрешность определения полей $\pm 0,2$ кЭ.

Сравнение измеренных величин полей анизотропии H'_{a1} со статическими измерениями, приведенными в табл. 3, показывает, 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 гиромагнитным

отношением [11]. Из опыта по ФМР в таких материалах определяется анизотропия не магнитного, а механического момента. Влияние констант анизотропии второго и третьего порядков возрастает с увеличением содержания ионов комплекса $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$.

Таблица 5

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

x	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
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

Динамические характеристики гексаферритов $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$

Динамические свойства нанопорошков исследовались резонаторным методом [12]. Спектры магнитной ($\mu = \mu' - i\mu''$) и диэлектрической ($\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$) проницаемостей порошка стронциевого гексаферрита приведены на рис. 7 и 8. Видно, что в данном диапазоне частот действительная часть магнитной проницаемости близка к единице, мнимая часть проницаемости мала, поскольку об-

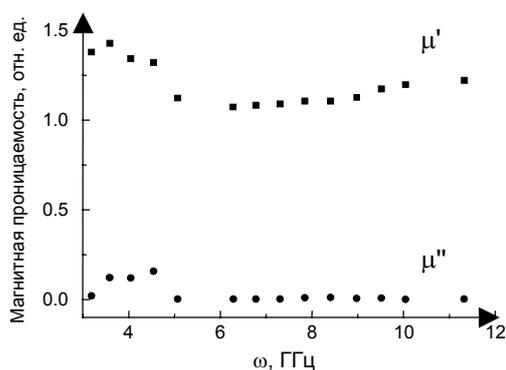


Рис. 7. Спектры магнитной проницаемости гексаферрита $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

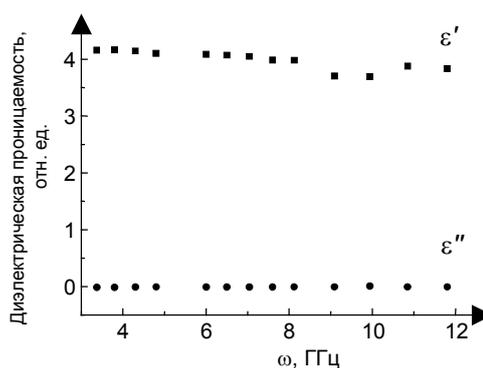


Рис. 8. Спектры диэлектрической проницаемости гексаферрита $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

ласть частот естественного ферромагнитного резонанса для данного материала, согласно табл. 4, находится на частоте ≈ 44 ГГц. Диэлектрические потери также малы. Динамика изменения действительной части магнитной проницаемости с увеличением концентрации ионов комплекса $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$ представлена на рис. 9. Поскольку с увеличением x частота ЕФМР понижается до 19 ГГц ($x = 1,0$), то в области низких частот наблюдается небольшой рост действительной части проницаемости. Измеренные величины мнимых частей магнитной проницаемости не превышают 0,1.

Диэлектрическая проницаемость порошков в диапазоне концентрацией ($0,5 \leq x \leq 1,0$) не меняется в исследованном диапазоне частот и составляет $\varepsilon = 5,7 - i0,3$.

Таким образом, метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в сочетании с предварительной механохимической обработкой и окончательной ферритизацией позволяет получать однодоменные порошки ферритов стронция. Предложены ресурсосберегающие способы получения сложных гексаферритов стронция, основанные на самораспространяющемся высокотемпературном синтезе и позволяющие по сравнению с керамическим способом уменьшить число операций и существенно снизить затраты производства. Для правильной трактовки динамических свойств гексаферритов системы $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ необходимо учитывать наряду с магнитокристаллической анизотропией еще и анизотропию магнитомеханического отношения. С увеличением содержания комплекса $\text{Co}^{2+}\text{Ti}^{4+}$ возрастает роль высших констант анизотропии. Анализ данных ФМР и результаты исследования анизотропии вышеуказанной системы в импульсных магнитных полях показывают, что синтезированные порошки гексаферритов при $x = 0,0-1,0$ являются весьма перспективными для создания на их основе радиопоглощающих устройств и покрытий на диапазон частот 20–50 ГГц.

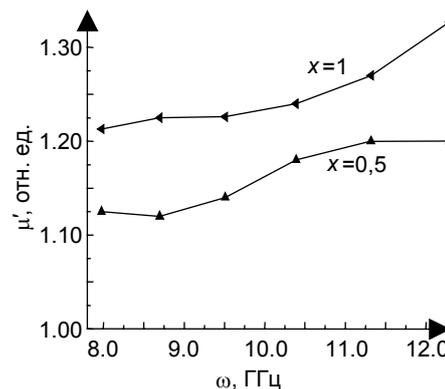


Рис. 9. Спектр действительной части проницаемости гексаферритов $\text{Sr}(\text{Co}_x\text{Ti}_x)\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$

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 Н. 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. Комаров А.В., Авакян П.Б., Нерсисян М.Д. // *ФГВ.* – 1993. – № 5. – С. 51–56.
6. Komarov A. V., Nersesyan V. D., Avakyan P. B., and Merzhanov A. G. // *Int. J. SHS.* – 1993. – V. 2. – No. 3. – P. 239–246.
7. Щурова А.Д., Перекалина Т.М., Чепарин В.П. // *ЖЭТФ.* – 1968. – Т. 55. – Вып. 4(10). – С. 1197–1203.
8. Kojima Н. *Ferromagnetic material*. V. 3 / ed. by E.P. Vohlfarth. Ch. 5. Fundamental properties of hexagonal ferrites with magnetoplumbite structure. – North-Holland Publishing Company, 1982. – С. 305–391.
9. Журавлев В. А. // *ФТТ.* – 1999. – Т. 41. – № 6. – С. 1050.
10. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука, 1973. – 591 с.
11. Власов К.Б., Ишмухаметов Б.Х. // *ФММ.* – 1961. – Вып. 11. – № 1. – С. 3.
12. Найден Е.П., Сусяев В.И., Бир А.В., Политов М.В. // *Журн. структ. химии.* – 2004. – Т. 45. – С. 102–105.

*Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

**Отдел структурной макрокинетики СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: ptica@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.06.12.

Найден Евгений Петрович, д.ф.-м.н., профессор;
 Журавлев Виктор Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент;
 Игин Воля Исаевич, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;
 Минин Роман Владимирович, к.т.н., науч. сотр.;
 Сусяев Валентин Иванович, к.ф.-м.н., доцент;
 Доценко Ольга Александровна, к.ф.-м.н., доцент.