

## ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 538.62, 548:537.611.46

*Е.П. НАЙДЕН\*, В.А. ЖУРАВЛЕВ\*, Р.В. МИНИН\*\*, В.И. ИТИН\*\*, Е.Ю. КОРОВИН\****СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-ГОРЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ<sup>1</sup>**

Исследованы фазовый состав, параметры структуры и основные магнитные характеристики гексаферрита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , полученного методом золь-гель-горения в сочетании с последующим отжигом при температуре  $850\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 6 ч. Проведено сравнение свойств синтезированного материала с изготовленным по обычной керамической технологии. Показана перспективность предлагаемого метода для производства порошков ферритовой керамики с гексагональной структурой.

**Ключевые слова:** синтез золь-гель-горением, гексаферриты, магнитокристаллическая анизотропия, ферромагнитный резонанс, радиоматериалы.

**Введение**

Оксидные ферримагнетики с гексагональной кристаллической структурой (гексаферриты) широко используются в различных областях современной техники. Согласно данным, приведенным в недавнем обзоре [1], в настоящее время наблюдается экспоненциальный рост числа публикаций, посвященных исследованию физических свойств и различным аспектам применений гексаферритов. Уникальность свойств гексаферритов обусловлена большими величинами полей магнитокристаллической анизотропии (МКА) и намагниченности насыщения [2]. Традиционно они используются в качестве материалов для постоянных магнитов, для магнитной записи информации, для разработки различных устройств СВЧ-, КВЧ-диапазонов частот, радиопоглощающих и радиозащитных покрытий. Всплеск интереса к этому классу материалов в последнее время обусловлен тем, что ряд из них обладает свойствами мультиферроиков при комнатных температурах [1, 3, 4].

Производство гексаферритов и изделий из них основано на многооперационной керамической технологии, которая включает целый ряд продолжительных операций [5]. В последнее время предложены новые энергосберегающие способы получения наноструктурных гексагональных оксидных ферримагнетиков, такие, как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [6–10], механохимический метод синтеза из солевых систем [11], золь-гель-метод и др. [1].

В данной работе для получения наноразмерных порошков гексаферрита бария М-типа состава  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  (Ba–M) применен метод золь-гель-горения, в основе которого лежит создание исходной коллоидной наносистемы, обладающей способностью реагировать в режиме горения. Приведены результаты исследования фазового состава, структурных параметров и магнитных свойств синтезированных материалов. Выполнено сопоставление этих характеристик с данными, измеренными на порошках гексаферрита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , изготовленных из выпускаемых промышленностью постоянных магнитов марки 19БА260. Эти анизотропные магниты получены методом мокрого прессования.

**Методика изготовления образцов**

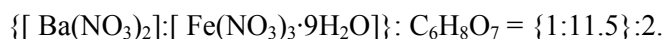
Синтез порошков гексаферритов бария методом золь-гель-горения (образец № 1) проведен по химической реакции



В качестве реагентов использовали водные растворы бария азотнокислого  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  (Ч, ГОСТ 3777-76), железа азотнокислого 9-водного  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (Ч, ТУ 6-09-02-553-96) и лимонной ки-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

слоты  $C_6H_8O_7$  (ГОСТ 3652-69) с концентрацией 1 М, которые смешивали в соответствии с соотношениями



Нитраты и лимонную кислоту растворяли в воде по отдельности. Затем проводили смешивание водных растворов. К полученной смеси по каплям добавляли концентрированный раствор гидроксида аммония  $NH_4OH$  (ЧДА, ГОСТ 3760-79) при постоянном перемешивании до тех пор, пока не установится pH раствора равный 7. pH среды измеряли с помощью портативного цифрового pH-метра Checker HI98103 фирмы «HANNA Instruments». Полученный золь нагревали на магнитной мешалке ES-6120 фирмы «ЭКРОС» при температуре от 80 до 90 °С в течение 3–5 ч. В результате нагрева он превращался в вязкий гель коричневого цвета, который вспенивался. Дальнейший нагрев пены геля до температуры 150–160 °С вызывал воспламенение и горение, которое протекало в течение нескольких минут. После горения получался рыхлый порошок, который легко растирался в ступке, превращаясь в тонкий порошок. Далее порошок прокаливали при 450 °С в течение 24 ч для удаления органических примесей. Окончательное формирование наночастиц гексаферрита  $BaFe_{12}O_{19}$  проводили, отжигая порошок при 850 °С в течение 6 ч.

Образец № 2 получен из ферритового постоянного магнита марки 19БА260. Магнит размагничивали путем нагрева выше температуры Кюри, выдержки при температуре 600 °С в течение 2 ч и охлаждения с выключенной печью. Затем проводили его размол в планетарной шаровой мельнице МПВ. Для экспериментов использовали фракцию с размером агломератов частиц менее 60 мкм.

### Методики исследований

Рентгенографические исследования проведены на поликристалльном дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 с реализацией геометрии съемки рентгенограмм в геометрии Брега – Брентано с фокусирующим пирографитовым кристаллом-монокроматором на вторичном пучке гамма-квантов. Для качественного анализа фазового состава использована компьютерная база данных рентгеновской порошковой дифрактометрии PDF4+ Международного центра дифракционных данных (ICDD, Denver, USA). Количественный анализ фазового состава и уточнение структурных параметров обнаруженных фаз проводили при помощи программы полнопрофильного анализа Powder Cell 2.4.

Анализ элементного состава проводился на последовательном волнодисперсионном спектрометре Shimadzu XRF 1800. Инфракрасный спектр снимался на ИК-фурье-спектрометре Nicolet 5700, France с приставкой диффузионного отражения.

Магнитные измерения состояли из исследования кривых намагничивания в импульсных магнитных полях до 30 кЭ на описанной в работе [12] установке и измерения спектров ферромагнитного резонанса (ФМР) по стандартной волноводной методике «на проход» в диапазоне частот 37–53 ГГц с помощью автоматизированного радиоспектроскопа. Для исследования ФМР порошки исследованных образцов помещали в тонкостенные кварцевые трубки с внутренним диаметром 0.7 мм и длиной 10 мм. Плотность порошковых образцов была приблизительно одинаковой и составляла  $\approx 2.8$  г/см<sup>3</sup>. Трубки помещали в прямоугольный волновод параллельно широкой стенке волновода, чтобы переменное магнитное поле было ориентировано вдоль оси образца. Постоянное намагничивающее поле направлено перпендикулярно широкой стенке волновода.

Измерение коэффициентов отражения электромагнитных волн от композитных пластин, помещенных на короткозамыкатель в волноводный тракт размером 5.2×2.6 мм, проведено с помощью анализатора цепей Agilent Technologis PNA-X N4257A в диапазоне частот 35–67 ГГц.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Рентгеновские дифрактограммы образцов № 1 и 2 приведены на рис. 1. Видно, что они содержат в основном дифракционные пики, соответствующие гексаферриту  $BaFe_{12}O_{19}$ , присутствуют и следы сопутствующих фаз. Результаты рентгеноструктурного анализа образцов сведены в табл. 1.

Согласно табл. 1, содержание основной фазы Ва–М в обоих образцах превышает 97 % и дополнительной фазой является магнетит. Образцы имеют близкие по величине постоянные решетки  $a$  и одинаковые значения постоянной решетки вдоль гексагональной оси  $c$ . Эти результаты близки к известным из литературы для гексаферрита Ва–М. На основе анализа физического уши-

рения дифракционных линий по величине областей когерентного рассеяния (ОКР) оценены средние размеры кристаллитов и величины внутренних упругих микронапряжений, пропорциональные относительному изменению межплоскостных расстояний ( $\Delta d/d$ ). Эти параметры у обоих образцов также близки друг к другу.

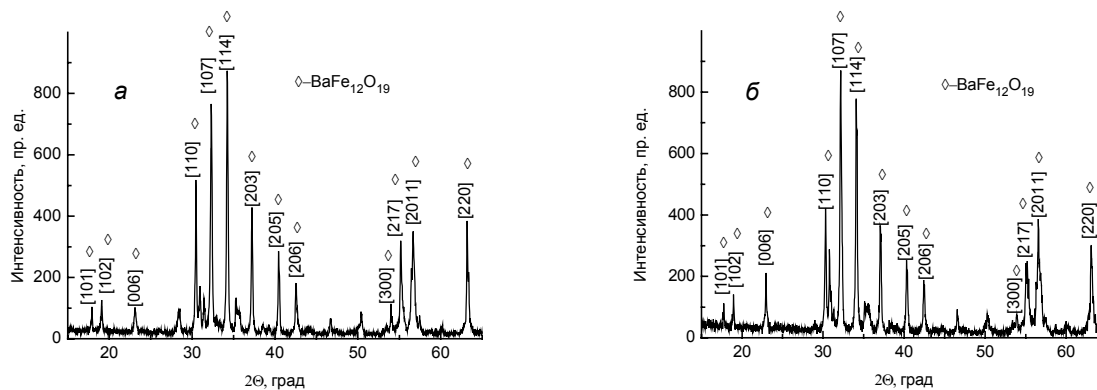


Рис. 1. Рентгенограммы образцов № 1 (а) и № 2 (б)

Таблица 1

**Фазовый состав исследованных материалов**

№ образца	Фазовый состав образцов, об. %		Постоян. решетки, Å		ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^3$
	BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	<i>a</i>	<i>c</i>		
1	98.6	1.4	5.9139	23.3130	87	1.3
2	97.4	2.6	5.9089	23.3130	80	1.1

Рентгенофлуоресцентный анализ продукта синтеза методом золь-гель-горения показал, что целевая фаза содержит 31.35 мас. % Fe и 6.09 мас. % Ba, что соответствует соединению с химической формулой Ba<sub>1.0</sub>Fe<sub>12.7</sub>O<sub>19</sub>.

Инфракрасный спектр образца № 1 после термической обработки представлен на рис. 2.

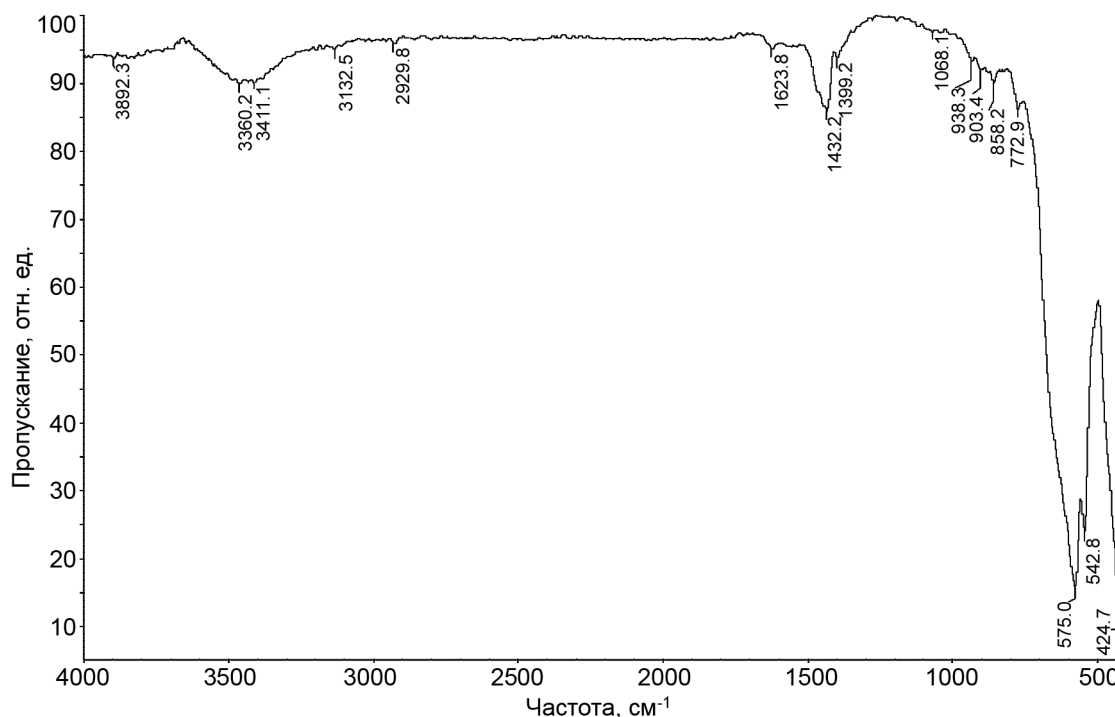


Рис. 2. Инфракрасный спектр образца № 1

В интервале частот 3400–3500  $\text{см}^{-1}$  наблюдается довольно широкая по сравнению с остальными полоса поглощения, обусловленная деформационными колебаниями групп O–H. При 1624  $\text{см}^{-1}$  наблюдается слабая линия поглощения, вызванная колебаниями H–O–H (изгибные вибрации молекул воды). Таким образом, на поверхности продукта, полученного методом золь-гель-горения, присутствует небольшое количество остаточной адсорбированной воды даже после проведения термообработки.

Полосы при 1432 и 1399  $\text{см}^{-1}$  связаны с направленными колебаниями C–H и  $-\text{CH}_2$ . Слабая полоса при 2930  $\text{см}^{-1}$  также может быть приписана асимметричным колебаниям  $-\text{CH}_2$ . Это свидетельствует о том, что органические продукты, образующиеся из-за участия в реакции лимонной кислоты, сохраняются в конечном продукте золь-гель-горения и прочно связаны с его поверхностью.

Три полосы поглощения, наблюдаемые для частот 575, 542.8 и 424.7  $\text{см}^{-1}$ , могут быть приписаны сильным колебаниям Fe–O и Ba–O, что указывает на формирование оксидного гексагонального ферритмагнетика Ba–M.

На рис. 3 приведены измеренные при комнатной температуре кривые намагничивания образцов № 1 (а) и № 2 (б). Стрелками указано направление изменения магнитного поля. Видно, что соответствующие увеличению поля участки кривых намагничивания образцов № 1 и 2 отличаются. Это может быть обусловлено различной морфологией образцов. Синтезированный золь-гель-горением образец состоит из отдельных однодоменных частиц, тогда как образец № 2, изготовленный размолотом полученного методом мокрого прессования ферритового магнита, состоит из наноструктурированных агломератов частиц размерами  $\approx 80$  нм. Агломераты имеют существенно большие размеры,  $\leq 60$  мкм.

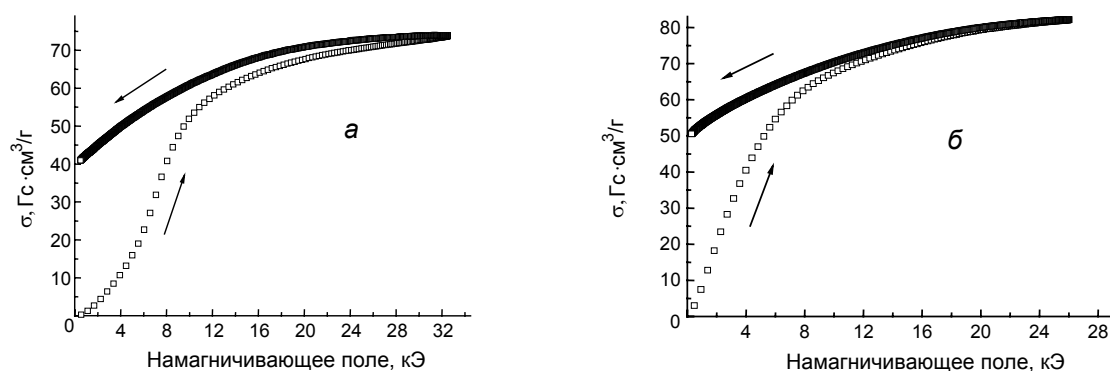


Рис. 3. Кривые намагничивания образцов № 1 (а) и № 2 (б)

Линейная экстраполяция высокополевых участков кривых намагничивания на нулевые намагничивающие поля дает оценку величины удельной намагниченности насыщения ( $\sigma_s$ ). Полученные значения для удельных остаточной намагниченности ( $\sigma_r$ ) и намагниченности насыщения ( $\sigma_s$ ) представлены в табл. 2. В двух последних колонках таблицы приведены рассчитанные по формуле  $M = \sigma \cdot \rho$  величины намагниченности единицы объема. Здесь  $\rho = 5.28 \text{ г/см}^3$  – рентгеновская плотность гексаферрита Ba–M [2].

Таблица 2

Результаты исследования кривых намагничивания

№ образца	$\sigma_r$ , Гс·см <sup>3</sup> /г	$\sigma_s$ , Гс·см <sup>3</sup> /г	$M_r$ , Гс	$M_s$ , Гс	$M_r / M_s$
1	40	69.4	211.2	366.4	0.58
2	50	73	264	385.4	0.69

Данные табл. 2 указывают на то, что величины намагниченностей насыщения образцов отличаются примерно на 5 %. Однако отличие остаточных намагниченностей более существенное и составляет  $\sim 20$  %. Отношение  $M_r / M_s$  образца № 1 близко к литературным данным  $\approx 0.5$  для изотропного поликристалла [1], тогда как у образца № 2 оно заметно выше. Эти факты также могут быть обусловлены различной морфологией образцов.

Исследование спектров ферромагнитного резонанса порошковых и поликристаллических оксидных ферритмагнетиков с гексагональной кристаллической структурой дает возможность определить из эксперимента ряд важных для практических применений магнитных параметров этих материалов:

- величины и знаки полей магнитокристаллической анизотропии ( $H_{ai}$ ),
- величины эффективного магнитомеханического отношения  $\gamma = ge/2mc$ , где  $g$  – эффективный  $g$ -фактор исследуемого материала;  $e$  – заряд;  $m$  – масса электрона;  $c$  – скорость света. Отметим, что в гексаферритах параметр  $\gamma$  может быть анизотропным [13].

Выполненные в приближении независимых зерен расчеты резонансных кривых ФМР [13] и компонент тензора магнитной проницаемости [14] одноосных однодоменных поликристаллических и порошковых материалов показали, что на кривых ФМР (или полевых зависимостях мнимых частей компонент тензора магнитной проницаемости) имеется две особенности: максимумы и (или) ступеньки. Причем по виду резонансных кривых можно определить, какой тип анизотропии – ось легкого намагничивания (ОЛН) или плоскость легкого намагничивания (ПЛН) – имеет данный материал. Особенности на кривых ФМР наблюдаются вблизи величин намагничивающих полей  $H_{\parallel}$  и  $H_{\perp}$ , соответствующих стационарным направлениям на угловой зависимости резонансного поля. Величины резонансных полей (частот) определяются формулами [13]

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

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

$$H_{\theta} = H'_{a1} + H_{a2} + H_{a3}, \quad H'_{a1} = H_{a1} + 4\pi M_S (N_{\perp} - (\gamma_{\perp} / \gamma_{\parallel})^2 N_{\parallel}). \quad (2)$$

Здесь  $H_{ai} = 2ik_i / M_S$  – поля магнитокристаллической анизотропии;  $N_{\perp}$ ,  $N_{\parallel}$  – поперечный и продольный размагничивающий факторы частицы, имеющей форму эллипсоида вращения, причем  $2N_{\perp} + N_{\parallel} = 1$ .

Низкополевая особенность соответствует резонансу кристаллитов, у которых направление магнитного поля ( $H$ ) близко к направлению легкого намагничивания. Высокополевая особенность соответствует резонансу кристаллитов, у которых поле ориентировано вблизи направлений трудного намагничивания. Гексаферрит Ва–М является материалом с большой положительной величиной поля анизотропии  $H_{a1} = 17$  кЭ, и ОЛН направлена вдоль гексагональной оси  $c$  кристаллита, а направления трудного намагничивания расположены в базисной плоскости, которая является плоскостью трудного намагничивания (ПТН) [2].

В доступном нам диапазоне намагничивающих полей экспериментально наблюдался только один максимум в поле, близком к  $H_{\parallel}$ , соответствующем направлению легкого намагничивания. Обработка экспериментальных спектров ФМР образцов № 1 и 2, снятых в диапазоне частот 37–53 ГГц, проводилась в два этапа. На первом этапе строились частотные зависимости резонансных полей. Далее методом наименьших квадратов по формуле (1) для  $\omega_{\parallel}$  определялись оценочные значения магнитомеханического отношения  $\gamma_{\parallel}$  и поля анизотропии  $H'_{a1}$ . На втором этапе, путем детального сопоставления формы экспериментальных и расчетных резонансных кривых на разных частотах, находились уточненные значения этих параметров. В расчетах магнитомеханическое отношение считалось изотропным  $\gamma_{\parallel} = \gamma_{\perp} = \gamma$ .

На рис. 4 представлены рассчитанные в приближении независимых зерен (линии) мнимые части диагональной компоненты тензора магнитной проницаемости и экспериментальные (точки) кривые ФМР образцов № 1 (а) и № 2 (б) для двух частот исследованного диапазона. Расчет компонент тензора МП проводился для величин намагниченностей насыщения, приведенных в табл. 2. Экспериментальные кривые нормировались на теоретические. Величины частот приведены в подписи к рис. 4.

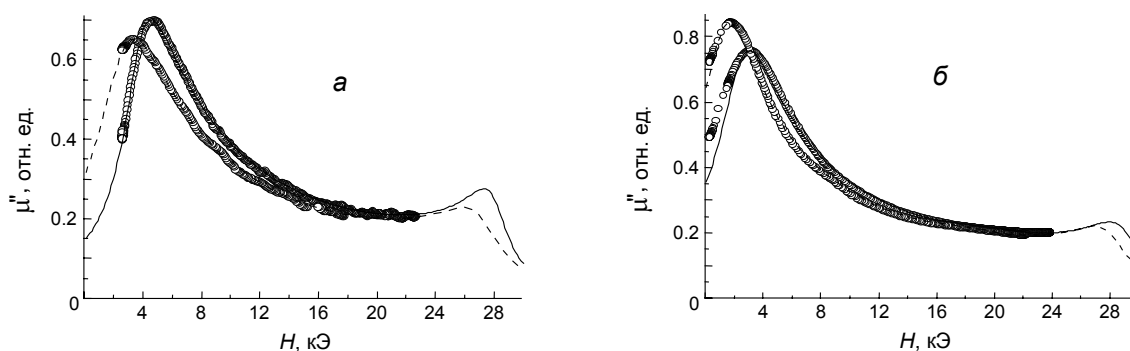


Рис. 4. Кривые ФМР образцов № 1 (а) и № 2 (б). Сплошные линии – частота 53 ГГц, пунктирные – 50 ГГц

С уменьшением частоты максимумы на кривых ФМР смещаются в сторону меньших полей. Рост потерь в нулевых полях с уменьшением частоты обусловлен приближением частоты высокочастотного магнитного поля к частоте естественного ферромагнитного резонанса, определяемой формулой

$$\omega_{\text{NFMР}} = \gamma_{\perp} H'_{a1}. \quad (3)$$

Расчетные кривые приведены в более широких пределах изменения намагничивающего поля, чем экспериментальные, чтобы показать наличие еще одного максимума вблизи поля  $H_{\perp}$ , соответствующего направлению трудного намагничивания. Величины магнитомеханических отношений, полей анизотропии и постоянных затухания в уравнении Ландау – Лифшица – Гильберта представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Измеренные методом ФМР магнитные параметры материалов**

№ образца	$\gamma/2\pi$ , ГГц/кЭ	$H'_{a1}$ , кЭ	$\alpha$
1, частота 50 ГГц	$2.80 \pm 0.02$	$15.4 \pm 0.1$	$0.11 \pm 0.01$
1, частота 53 ГГц	$2.80 \pm 0.02$	$15.4 \pm 0.1$	$0.07 \pm 0.01$
2, частота 50 ГГц	$2.80 \pm 0.02$	$16.7 \pm 0.1$	$0.1 \pm 0.01$
2, частота 53 ГГц	$2.80 \pm 0.02$	$16.7 \pm 0.1$	$0.09 \pm 0.01$

Согласно табл. 3, измеренные величины магнитомеханических отношений образцов, синтезированных разными методами, в пределах погрешности эксперимента совпадают с магнитомеханическим отношением для спина свободного электрона. Величина эффективного поля анизотропии образца № 2 близка к приведенным в литературе данным для гексаферрита Ва–М [1, 2], а у образца № 1 оно заметно меньше. Возможная причина этого – влияние вклада в  $H'_{a1}$  от анизотропии формы частиц. Можно считать, что агломераты частиц размером менее 60 мкм, из которых состоит образец № 2, имеют близкую к сферической форму и размагничивающие поля агломератов не дают вклада в суммарную анизотропию. Тогда разность между полями анизотропии образцов № 1 и 2 можно приписать добавке от анизотропии формы зерна:  $4\pi M_S (N_{\perp} - N_{\parallel}) = -1.3$  кЭ. Отсюда была получена оценка для размагничивающих факторов частиц образца №1:  $N_{\perp} \approx 0.24$ ,  $N_{\parallel} \approx 0.52$ . Они соответствуют сплюснутому сфероиду с отношением осей  $\approx 2$ . Это вполне реальная оценка анизотропии формы однодоменных наночастиц ферромагнетиков с гексагональной структурой [15].

Для исследования радиопоглощающих свойств образцов были изготовлены композиты примерно с 40 об. % содержанием ферромагнитного наполнителя. В качестве связующего был использован 10 %-й водный раствор поливинилового спирта. Полученные композиты в виде вкладышей толщиной  $\sim 10$  мм помещали на короткозамыкатель в волноводный тракт сечением  $5.2 \times 2.6$  мм<sup>2</sup>. Результаты измерения коэффициентов отражения в области частот ЕФМР представлены на рис. 5. Видно, что образцы имеют приблизительно одинаковые радиопоглощающие свойства. Коэффициент отражения в полосе частот  $\sim 9$  ГГц не превышает  $-10$  дБ.

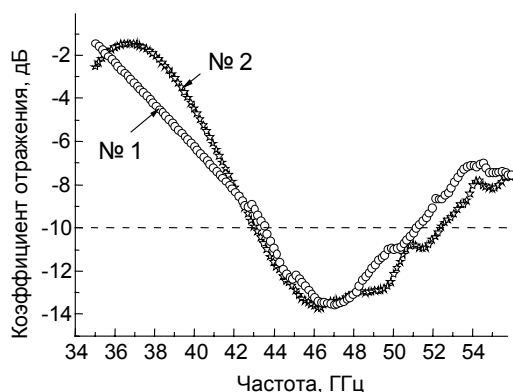


Рис. 5. Коэффициенты отражения для образцов № 1 и 2

магнитную анизотропию материалов, синтезированных золь-гель-горением. Радиопоглощающие свойства исследованных образцов близки.

Таким образом, использованная в данной работе технология синтеза порошков гексаферрита бария методом золь-гель-горения обеспечивает получение материалов с магнитными характеристиками, не уступающими свойствам материалов, изготовленных по традиционной керамической технологии. Достоинством предлагаемой технологии является существенное сокращение времени синтеза и энергоемкости процесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robert C. Pullar // *Prog. Mater. Sci.* – 2012. – V. 57. – P. 1191–1334.
2. Смит Дж., Вейн Х. Ферриты. – М.: ИЛ, 1958. – 504 с.
3. Ebnabbasi K., Mohebbi M., and Vittoria C. // *J. Appl. Phys.* – 2013. – V. 113. – P. 17C703; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4793606>.
4. Ebnabbasi K., Mohebbi M., and Vittoria C. // *J. Appl. Phys.* – 2013. – V. 113. – P. 17C707; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4794745>.
5. Рабкин Л.И., Соскин С.А., Эпштейн Б.Ш. Технология ферритов. – М.: Госэнергоиздат, 1968. – 384 с.
6. Мержанов А.Г., Нерсисян М.Д. // *Журн. Всес. химич. общества им. Д.И. Менделеева.* – 1990. – Т. 35. – № 6. – С. 700–707.
7. Минин Р.В., Найдено Е.П., Итин В.И., Журавлев В.А. // *Изв. вузов. Физика.* – 2008. – Т. 51. – № 9/2. – С. 223–225.
8. Найдено Е.П., Журавлев В.А., Суслев В.И. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2010. – Т. 53. – № 9. – С. 87–95.
9. Минин Р.В., Итин В.И., Найдено Е.П., Журавлев В.А. // *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* – 2011. – № 1. – С. 41–45.
10. Naiden E.P., Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., et al. // *Int. J. Self-Propagat. High-Temperat. Synthesis.* – 2011. – V. 20. – No. 3. – P. 200–207.
11. Найдено Е.П., Итин В.И., Терехова О.Г. и др. // *ФТТ.* – 2008. – Т. 50. – Вып. 5. – С. 857–863.
12. Креслин В.Ю., Найдено Е.П. // *Приборы и техника эксперимента.* – 2002. – № 1. – С. 63–68.
13. Журавлев В.А. // *ФТТ.* – 1999. – Т. 41. – № 6. – С. 1050.
14. Журавлев В.А., Мещеряков В.А. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 12. – С. 62–69.
15. Журавлев В.А., Найдено Е.П. // *Изв. вузов. Физика.* – 2008. – Т. 51. – № 1. – С. 33–38.

\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

\*\*Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, Россия  
E-mail: ptica@mail.tsu.ru

#### Выводы

В работе проведен сравнительный анализ свойств порошков гексаферрита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , полученных методом золь-гель-горения и размолот серийно выпускаемых магнитов марки 19БА260. Согласно данным по ОКР, частицы порошков имеют приблизительно одинаковые размеры около 80 нм. Однако существенное отличие технологий синтеза и морфологии порошков приводит к заметному отличию их магнитных характеристик, в частности величин эффективных полей магнитной анизотропии. Проведена оценка вклада от анизотропии формы в

Поступила в редакцию 26.05.14,  
после доработки – 15.10.14.

Найдено Евгений Петрович, д.ф.-м.н., профессор;  
Журавлев Виктор Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент;  
Минин Роман Владимирович, к.т.н., науч. сотр.;  
Итин Воля Исаевич, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;  
Коровин Евгений Юрьевич, к.ф.-м.н., доцент.