

# Влияние диамагнитных катионов $\text{Sc}^{3+}$ на магнитоупругую энергию гексаферритов $M$ -типа

© А.Г. Чесноков, Е.П. Найден

Сибирский физико-технический институт,  
634050 Томск, Россия

E-mail: Chesn@elefot.tsu.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 13 февраля 2001 г.)

Проведено исследование полевых и температурных зависимостей констант магнитострикции для монокристаллического образца гексаферрита  $\text{BaFe}_{10.9}\text{Sc}_{1.1}\text{O}_{19}$ . Показано, что замещение ионов железа скандием приводит к существенному увеличению констант магнитострикции и аномальным температурным зависимостям в области температур ниже 250 К. Оценены величины констант магнитоупругого взаимодействия.

Известно, что замещение ионов трехвалентного железа катионами скандия является эффективным способом изменения величины поля и констант магнитной кристаллографической анизотропии (МКА) гексаферритов структурного типа  $M$ . Так, в системе  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Sc}_x\text{O}_{19}$  с ростом содержания скандия первая константа анизотропии быстро уменьшается и даже меняет знак при  $x = 1.8$  [1]. Тенденция катионов скандия к размещению в позициях  $4e \times 1/2$  (бипирамида), магнитоактивные катионы которых в основном и формируют МКА ферромагнетиков данного структурного типа, обуславливает сильную концентрационную зависимость поля анизотропии. Основной вклад в магнитоупругую энергию  $\text{Ba}-M$  также вносят катионы, располагающиеся в бипирамидальной позиции. В связи с этим можно ожидать, что замещение катионов  $\text{Fe}^{3+}$  в этой позиции будет влиять не только на МКА, но и на магнитоупругую энергию, а следовательно, и на константы магнитострикции гексаферритов на основе  $\text{Ba}-M$ .

В литературе имеются лишь фрагментарные сведения о поведении констант магнитострикции некоторых простейших гексаферритов ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  —  $\text{Ba}-M$ ,  $\text{BaFe}_{18}\text{O}_{27}$  —  $\text{Fe}_2-W$  и др.), причем данные получены в основном при комнатной температуре [2–5]. Остается открытым до настоящего времени вопрос об изменении магнитострикции при замещении ионов железа диамагнитными (в частности, ионами  $\text{Sc}^{3+}$ ) либо парамагнитными катионами с отличающейся электронной структурой. В то же время исследование скоростей распространения продольных и сдвиговых ультразвуковых колебаний в монокристаллическом образце  $\text{Ba}-M$  и скандийзамещенного гексаферрита на его основе показало, что константы упругости  $C_{11}$  и  $C_{12}$  при температурах выше 250 К совпадают в пределах точности эксперимента, однако при понижении температуры ход кривых  $C_{ij}(T)$  существенно различен. Температурные зависимости констант  $C_{33}$  для вышеуказанных гексаферритов различаются во всем исследованном интервале температур [6,7]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование магнитострикции гексаферрита  $M$ -типа с частичным замещением ионов железа ионами скандия, а

также оценка влияния данного замещения на параметры магнитоупругих взаимодействий.

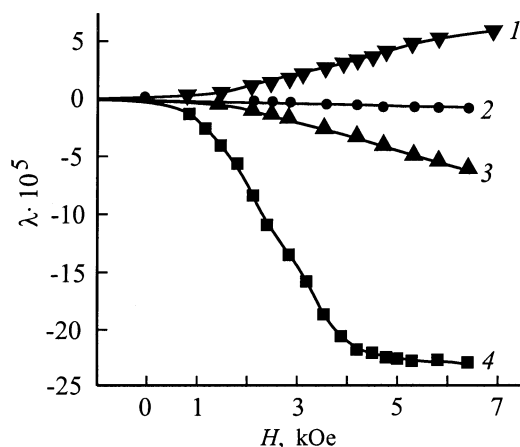
Монокристаллические образцы гексаферритов системы  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Sc}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 1.6$  по шихте) были выращены из раствора в расплаве с использованием боробариевого растворителя. Для измерений магнитострикции из крупного монокристалла был вырезан образец в форме параллелепипеда с линейными размерами  $a \times b \times c = 10 \times 2 \times 1$  мм, при этом кристаллографическая ось  $a$  параллельна длинной оси параллелепипеда, а ось  $c$  нормальна плоскости  $ab$  параллелепипеда. Химический состав данного образца, определенный методами нейтрон-активационного и рентгеновского флуоресцентного анализов, соответствует формуле  $\text{BaFe}_{10.9}\text{Sc}_{1.1}\text{O}_{19}$ . Сведения о распределении катионов по подрешеткам получены путем минимизации фактора недостоверности для интегральных интенсивностей 11 отражений базисной плоскости. Катионы скандия размещаются в основном в октаэдрических позициях шпинельного блока ( $2a$ ) и в квазитетраэдрических положениях гексагонального блока структуры (подрешетка  $4e \times 1/2$ ). Кроме того, небольшое количество ионов  $\text{Sc}^{3+}$  занимает октаэдрические позиции гексагонального блока  $R$  и межблочные октаэдры. Измеренные для данного образца значения намагниченности насыщения  $M_s$  и поля анизотропии  $H_a$  соответствуют величинам, определенным для указанного выше химического состава по концентрационным зависимостям  $M_s(x)$  и  $H_a(x)$ , приведенным в литературе [1].

Измерения констант магнитострикции проводились тензометрическим методом. В качестве датчиков были использованы германиевые дендритные тензорезисторы типа ГДТ с коэффициентом тензочувствительности  $S = +55$  и длиной базы 10 мм. При указанной выше форме образца возможно непосредственное измерение констант магнитострикции  $\lambda_a(\alpha_1 = \beta_1 = 1)$ ,  $\lambda_b(\alpha_2 = \beta_1 = 1)$  и  $\lambda_{\perp}(\alpha_3 = \beta_1 = 1)$ , где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  — направляющие косинусы направления намагничивания и направления измерения магнитострикции соответственно. Константа магнитострикции  $\lambda_c$  была определена методом рентгеновской дилатометрии.

Упругие и магнитоупругие константы соединений  $Ba-M$ ,  $BaSc-M$  при комнатной температуре

Материал	$C_{11}$ , $10^{10} \text{ N/m}^2$	$C_{12}$ , $10^{10} \text{ N/m}^2$	$C_{33}$ , $10^{10} \text{ N/m}^2$	$C_{44}$ , $10^{10} \text{ N/m}^2$	$B_{12}$ , $10^6 \text{ N/m}^2$	$B_{22}$ , $10^6 \text{ N/m}^2$	$B^{\varepsilon^2}$ , $10^6 \text{ N/m}^2$
$Ba-M$ [7]	31.80	14.56	24.26	7.17	-1.03	-3.56	1.37
$BaSc-M$	30	15	18	6.5	-2.5	-8.8	7.4

На рис. 1 представлены зависимости констант магнитострикции от величины намагничивающего поля. Для константы  $\lambda_{\perp}$  наблюдается насыщение в поле порядка 4 кОе. Наблюдаемый эффект, по-видимому, обусловлен наличием на поверхности образца замыкающих доменов, магнитные моменты в которых в отсутствие намагничивающего поля нормальны направлению легкого намагничивания в объеме образца. При намагничивании моменты в замыкающих доменах будут поворачиваться вплоть до полей, при которых доменная структура исчезает. Таким образом, поле 4 кОе соответствует полю технического насыщения. Полевые зависимости констант магнитострикции  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$  и  $\lambda_{45}$  (магнитострикция вдоль оси  $a$  при намагничивании под углом  $45^\circ$ ) ведут себя монотонно с тенденцией к насыщению при  $H > 7$  кОе, максимальная величина магнитострикции не превышает  $5 \cdot 10^{-5}$ , т.е. имеет тот же порядок, что и в случае незамещенного  $Ba-M$ . Зависимость константы магнитострикции  $\lambda_c$  мало отличается от  $\lambda_b(T)$  и на рис. 1 не показана.



**Рис. 1.** Зависимость констант магнитострикции от величины приложенного поля при комнатной температуре. 1 —  $\lambda_b$ , 2 —  $\lambda_a$ , 3 —  $\lambda_{45}$ , 4 —  $\lambda_{\perp}$ .

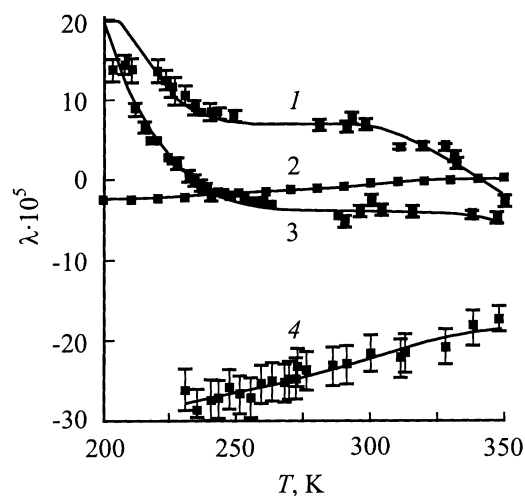
На рис. 2 приведены температурные зависимости констант магнитострикции при намагничивающем поле 8 кОе. Выбор интервала температур, в котором проводились измерения, ограничен линейным участком характеристик германиевых тензорезисторов. Константы магнитострикции слабо меняются в интервале температур 250–350 К. При понижении температур ниже 250 К константы  $\lambda_b$  и  $\lambda_{45}$  быстро возрастают, что, возможно, связано с образованием при этих температурах неколлинеарной магнитной структуры спирального ти-

па [8]. Отметим также, что константы магнитострикции  $\lambda_b$  и  $\lambda_{45}$  меняют знак при температурах 330 и 230 К соответственно.

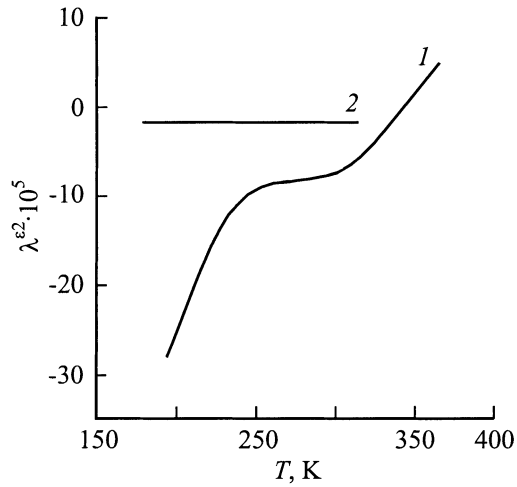
Отсутствие в литературе данных о температурных зависимостях  $\lambda_i$  для  $Ba-M$  не позволяет провести корректный анализ влияния замещения ионов железа катионами скандия на эти характеристики. Можно, однако, провести сравнение температурных зависимостей константы магнитострикции  $\lambda^{\varepsilon^2} = \lambda_a - \lambda_b$ , сведения о температурной зависимости которой для монокристаллического образца гексаферрита  $Ba-M$  в интервале 80–300 К приведены в [9]. На рис. 3 представлены эти данные для  $Ba-M$  (кривая 2) и исследованного нами скандийзамещенного соединения (кривая 1). Согласно выводам [10], константа магнитоупругого взаимодействия  $B^{\varepsilon^2}$  связана с соответствующей константой магнитострикции и упругими константами простым соотношением

$$B^{\varepsilon^2} = -\lambda^{\varepsilon^2}(C_{11} - C_{12}).$$

Поскольку в исследованной области температур  $C_{11}$  и  $C_{12}$  меняются слабо, можно считать, что величина  $(C_{11} - C_{12})$  является постоянной и характер зависимости  $B^{\varepsilon^2}(T)$  определяется поведением  $\lambda^{\varepsilon^2}(T)$ . Полученные нами результаты и литературные данные о температурных зависимостях упругих констант позволили оценить некоторые магнитоупругие константы для соединения  $BaSc-M$ . Методика расчета аналогична использованной в [10]. Результаты расчетов приведены в таблице. Введение ионов скандия слабо влияет на скорости распростра-



**Рис. 2.** Зависимость констант магнитострикции при изменении температуры. 1 —  $\lambda_b$ , 2 —  $\lambda_a$ , 3 —  $\lambda_{45}$ , 4 —  $\lambda_{\perp}$ .



**Рис. 3.** Температурная зависимость константы  $\lambda^2$ .  
1 — BaSc-M, 2 — Ba-M.

нения ультразвука и соответственно на модули упругости в окрестности комнатной температуры, за исключением величины  $C_{33}$ . Заметное различие температурных зависимостей прочих модулей упругости наблюдается лишь при температурах ниже 220 К. В то же время константы магнитострикции замещенного соединения существенно выше во всем исследованном интервале температур, что является следствием увеличения при замещении ионов железа скандием магнитоупругих констант. Наиболее вероятной микроскопической причиной этого является, по-видимому, нарушение центросимметричности замещенного кристалла при статистическом размещении катионов  $\text{Sc}^{3+}$ , что приводит к возрастанию вклада антисимметричного обмена Дзялошинского–Мория в анизотропную составляющую магнитной энергии.

Авторы выражают глубокую признательность Л. Н. Безматерных, предоставившему образцы монокристаллов гексаферритов для исследования.

## Список литературы

- [1] Т.М. Перекалина, В.П. Чепарин. ФТТ **9**, 11, 3205 (1967).
- [2] С.П. Кунцевич, Ю.А. Мамалуй, А.С. Мильнер. ФММ **26**, 4, 610 (1968).
- [3] С.П. Кунцевич, В.П. Палехин. ФТТ **15**, 11, 3460 (1973).
- [4] С.П. Кунцевич, В.П. Палехин. ФТТ **20**, 9, 2869 (1978).
- [5] С.П. Кунцевич, Ю.А. Мамалуй, А.С. Мильнер. УФЖ **16**, 1, 67 (1971).
- [6] А.М. Капитонов. Тез докл. XV Всесоюз. конф. по ФМЯ. Пермь (8–11 сент. 1981). Т. 1. С. 69.
- [7] Т.П. Сорокина, А.М. Капитонов. Тез. докл. XVIII Всеоюз. конф. по ФМЯ. Калинин (3–6 окт. 1988). Т. 2. С. 291.
- [8] О.П. Алешко-Ожевский, Р.А. Сизов. Письма в ЖЭТФ **7**, 6, 207 (1968).
- [9] С.П. Кунцевич, Ю.А. Мамалуй, В.П. Палехин. ФТТ **22**, 7, 2192 (1980).
- [10] H. Klimker, M. Rosen. Phys. Rev. **B7**, 5, 2054 (1973).