

# Дипольный вклад ионов $\text{Fe}^{3+}$ позиций $12k$ в константу энергии анизотропии гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

© А.А. Безлепкин, С.П. Кунцевич

Харьковский национальный университет,  
61077 Харьков, Украина

(Поступила в Редакцию 9 октября 2000 г.)

При низких температурах изучена анизотропия локальных полей на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в позициях  $12k$  феррита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Разделены вклады в анизотропию локальных полей анизотропии дипольного и сверхтонкого полей. Рассчитан обусловленный межйонным магнитным диполь-дипольным взаимодействием вклад ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в позиции  $12k$  в константу энергии анизотропии  $K_1$ . Он составляет более половины экспериментально определенной величины  $K_1$ .

Работа финансирована Министерством образования Украины.

Гексаферриты структурного типа  $\text{M MeFe}_{12}^{3+}\text{O}_{19}$  ( $\text{Me}=\text{Pb}^{2+}, \text{Ba}^{2+}, \text{Si}^{2+}, \text{Ca}^{2+}$ ) содержат только один тип магнитоактивных ионов —  $\text{Fe}^{3+}$ . Эти ферриты обладают на два порядка большими значениями константы энергии анизотропии по сравнению с ферритами-гранатами и ферритами-шпинелями, содержащими в качестве магнитоактивных также только ионы  $\text{Fe}^{3+}$ . Большие значения констант и соответственно полей анизотропии  $\text{M}$  гексаферритов обуславливают их обширные технические применения, поэтому выяснение физических механизмов, определяющих высокоанизотропные свойства этих ферритов, представляет не только научный, но и практический интерес.

В гексаферритах  $\text{M}$  типа ионы  $\text{Fe}^{3+}$  распределены по пяти кристаллографически неэквивалентным позициям, образующим пять подрешеток  $12k(a)$ ,  $2a(b)$ ,  $2b(e)$ ,  $4f_1(c)$  и  $4f_2(d)$ . Из двенадцати ионов железа, входящих на формульную единицу  $\text{MeFe}_{12}\text{O}_{19}$ , шесть находятся в позициях  $12k$  (подрешетка  $a$ ). Поэтому особый интерес представляет вычисление вклада этих позиций в величину константы и соответственно энергии анизотропии. В данной работе предложен метод расчета подрешеточных вкладов, обусловленных диполь-дипольным взаимодействием ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , исходя из данных по анизотропии локальных полей на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ , полученных методом ЯМР. На примере феррита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  ( $\text{BaM}$ ) для низких температур рассчитан вклад диполь-дипольного взаимодействия в константу энергии анизотропии  $K_1$  ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в позициях  $12k$ .

## 1. Образцы и методики измерений

В качестве образцов использовались монокристаллы  $\text{BaM}$ , выращенные методом раствора в расплаве флюса  $\text{BaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ . Синтез кристаллов проводился в температурном интервале 1420–1300 К. Образцы имели 95% обогащение изотопом  $^{57}\text{Fe}$ . Фазовый состав кристаллов контролировался рентгенографическим методом. Постоянные кристаллической решетки при комнатной температуре:  $a = 0.589$ ,  $c = 2.319$  nm. Частота ЯМР

определялась с помощью некогерентного спектрометра спинового эха. Анизотропия локальных частот ЯМР находилась как разность частот спин-эхо спектров, полученных в магнитном поле, большем поля насыщения образца, приложенном вдоль гексагональной оси (ось  $c$ ) и в базисной плоскости.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

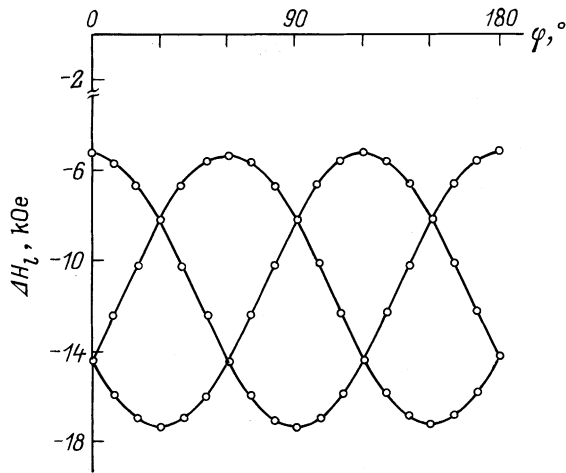
Зависимость частоты ЯМР ядер  $^{57}\text{Fe}$  от ориентации намагниченности в монокристаллах  $\text{BaM}$  подробно изучена нами и результаты этих исследований приведены в работе [1]. В частности, для ядер в позициях  $12k$  обнаружена сильная анизотропия локальных частот при переориентации намагниченности (и соответственно магнитных моментов ионов  $\text{Fe}^{3+}$ ) образца не только от оси  $c$  к базисной плоскости, но и в пределах базисной плоскости. Локальная частота ЯМР однозначно определяется локальным полем на ядрах и это дает возможность по ориентационным зависимостям частоты определить анизотропию локальных полей. На рисунке точками приведена зависимость анизотропии локальных полей  $\Delta H_l$  на ядрах ионов  $\text{Fe}^{3+}$  подрешетки ( $a$ ) (позиции  $12k$ ), полученных на основании данных работы [1] по формуле

$$\Delta H_l(\varphi) = \gamma[\nu^\perp(\varphi) - \nu^\parallel], \quad (1)$$

где  $\gamma = 0.1377$  kOe/MHz — гиромагнитное отношение для ядер  $^{57}\text{Fe}$ ,  $\nu^\perp(\varphi)$  — частота ЯМР в поле, приложенном в базисной плоскости под углом  $\varphi$  относительно оси  $a_1$ ,  $\nu^\parallel$  — частота ЯМР в поле такой же величины, но приложенном вдоль оси  $c$ . Из рисунка следует, что имеются три группы ядер, которые при расположении вектора намагниченности в базисной плоскости имеют различную анизотропию локальных полей  $\Delta H_l$ .

Как известно, анизотропию локального поля на ядре  $\Delta H_l$  можно представить как сумму вкладов анизотропии дипольных полей  $\Delta H_d$  и анизотропии сверхтонкого поля  $\Delta H_{\text{hf}}$  [2]

$$\Delta H_l = \Delta H_d + \Delta H_{\text{hf}}. \quad (2)$$



Зависимость анизотропии локального поля на ядрах  $^{57}Fe$  подрешетки  $a$  от ориентации намагниченности в базисной плоскости в феррите  $BaFe_{12}O_{19}$  при температуре 77 К и внешнем поле 21.3 кОе.

Приведенные на рисунке зависимости  $\Delta H_l(\varphi)$  могут быть описаны соотношением вида

$$\Delta H_l(\varphi) = \Delta H_{hf} + \Delta H_d^\varphi [1 - \cos 2(\varphi + n\pi/3)], \quad (3)$$

где  $n = 0, 1, 2$  — номер группы ядер.

Построенные по этому соотношению зависимости  $\Delta H_l(\varphi)$  с использованием значений  $\Delta H_{hf} = -5.3$  и  $\Delta H_d^\varphi = -6.0$  кОе на рисунке приведены сплошными линиями.

В работе [3] для позиций  $12k$  М-структуры была рассчитана анизотропия дипольных полей для  $T = 0$  при изменении ориентации спинов ионов  $Fe^{3+}$  от базисной плоскости к гексагональной оси  $c$ . Было показано, что при ориентации намагниченности (спинов ионов  $Fe^{3+}$ ) в базисной плоскости (перпендикулярно оси  $c$ ) совокупность ионов  $Fe^{3+}$  подрешетки  $a$  (позиции  $12k$ ) распадается на три равные по количеству группы, для которых анизотропия дипольных полей зависит от ориентации намагниченности в этой плоскости относительно оси  $a_1$  базиса. Из выражения для дипольных полей в позициях  $12k$ , полученного в работе [3], путем формальных математических преобразований можно получить следующее выражение для  $\Delta H_d^n$  для каждой из трех групп ядер ионов  $Fe^{3+}$ :

$$\Delta H_d^n = \Delta H^c + \Delta H_d^\varphi ([1 - \cos 2(\varphi + n\pi/3)]), \quad (4)$$

где  $n = 0, 1, 2$ ,  $\Delta H^c$  — постоянная составляющая дипольного поля,  $\Delta H_d^\varphi$  — компонента дипольного поля, зависящая от ориентации намагниченности в базисной плоскости.

Из данных [3] следует, что  $|\Delta H^c| \ll |\Delta H_d^\varphi|$ , поэтому выражение (4) можно приближенно представить в виде

$$\Delta H_d^n \approx \Delta H_d^\varphi [1 - \cos 2(\varphi + n\pi/3)]. \quad (5)$$

Из выражений (2)–(4) следует, что величину  $\Delta H_{hf} = -5.3$  кОе при 77 К следует интерпретировать

как анизотропию сверхтонкого поля и она, как видно из экспериментальных данных, одинакова по величине для всех трех групп ядер в позициях  $12k$ .

В рамках модели, допускающей, что анизотропия дипольного поля на ядрах ионов  $Fe^{3+}$  и в области локализации их электронных магнитных моментов мало различается, можно вычислить вклад ионов  $Fe^{3+}$  в  $12k$  позициях  $K_{1a}^d$  в константу энергии анизотропии  $K_1$  за счет межйонного диполь-дипольного взаимодействия. Выражение, связывающее  $K_{1a}^d$  и  $\Delta H_d^\varphi$ , для определенного угла  $\varphi$  задается соотношением

$$K_{1a}^d = -(1/2) \sum_n J_a^n \Delta H_d^\varphi [1 - \cos 2(\varphi + n\pi/3)], \quad (6)$$

где  $J_a^n$  — удельная намагниченность  $n$ -й группы ионов  $Fe^{3+}$  в  $12k$  позициях. Поскольку число ионов железа во всех трех группах одинаково,  $3J_a^n = J_a$ , где  $J_a$  — удельная намагниченность подрешетки  $a$ . Под удельной намагниченностью подрешетки понимается магнитный момент подрешетки, отнесенный к единице объема. Она может быть определена по методике, описанной с работе [4], если известна намагниченность насыщения феррита. Для исследуемых кристаллов при 77 К намагниченность насыщения составляет  $J_s = 550$  Г. В таком случае, согласно [4],  $J_a = 825$  и  $J_a^n = 275$  Г. Воспользовавшись величинами  $\Delta H_d^\varphi = -6.0$  кОе,  $J_a^n = 275$  Г и соотношением (6), для 77 К получим  $K_{1a}^d = 2.55 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>3</sup> для угла  $\varphi = 0$ .

Поскольку для тригонометрических функций, входящих в выражение (6) выполняется соотношение

$$\cos 2\varphi + \cos 2(\varphi + \pi/3) + \cos 2(\varphi + 2\pi/3) = \text{const},$$

расчетное значение  $K_{1a}^d$  не зависит от угла  $\varphi$ .

Полученное значение  $K_{1a}^d = 2.55 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>3</sup> вполне удовлетворительно согласуется со значением  $K_{1a}^d = 2.7 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>3</sup> для той же температуры, полученным в работе [5] из данных по температурной зависимости константы анизотропии  $K_1$  феррита ВаМ. Величина константы энергии анизотропии этого феррита при 77 К составляет  $4.4 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>3</sup>.

Из расчетов, приведенных в настоящей работе и в [5], следует, что при низких температурах вклад ионов  $Fe^{3+}$  в позициях  $12k$  феррита ВаМ за счет межйонного диполь-дипольного взаимодействия составляет более половины величины константы энергии анизотропии  $K_1$ .

## Список литературы

- [1] А.А. Безлепкин, С.П. Кунцевич, Ю.А. Попков. ФНТ **15**, 8, 875 (1989).
- [2] Е.А. Туров, М.П. Петров. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. Мир, М. (1969). 156 с.
- [3] Н. Stepankova, J. Englich, B. Sedlak. Czech. J. Phys. **B33**, 816 (1983).
- [4] С.П. Кунцевич, А.А. Безлепкин. ФТТ **29**, 9, 2595 (1987).
- [5] С.П. Кунцевич. Вестник ХГУ. Сер. Физика **440**, 3, 125 (1999).