

Особенности магнитокалорического эффекта в окрестностях спин-ориентационных переходов гексагональных ферритмагнетиков

© Е.П. Найден, С.М. Жилияков

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете, 634050 Томск, Россия

(Поступила в Редакцию 7 августа 1996 г.
В окончательной редакции 13 января 1997 г.)

Характерной особенностью ферромагнетиков гексагональной сингонии, содержащих парамагнитные катионы с орбитально вырожденным состоянием (Co^{2+} , Fe^{2+}), является наличие одного или нескольких спин-переориентационных фазовых превращений. Реализация конкретного типа магнитного состояния (конус, плоскость или ось легкого намагничивания) и условий переходов между ними определяется соотношением констант магнитной кристаллографической анизотропии (МКА) различных порядков. При воздействии на магнетик внешнего магнитного поля изменяется его магнитное состояние, в результате изменения внутренней энергии выделяется или поглощается тепло. При соблюдении адиабатических условий это проявляется как изменение температуры магнетика — так называемый магнитокалорический эффект (МКЭ). В соответствии с общей теорией фазовых переходов в окрестности спин-ориентационных превращений физические характеристики магнетика должны иметь особенности, что должно найти отражение и в поведении МКЭ.

В то же время в литературе практически отсутствуют сведения об исследованиях МКЭ в ферритмагнетиках гексагональной сингонии, в которых энергия анизотропии может быть весьма велика и конкурировать с энергией обменного взаимодействия. Кроме того, в этих соединениях при определенных условиях реализуются так называемые процессы намагничивания первого рода, проявление которых в термомагнитных эффектах до сих пор не обсуждалось. Результаты экспериментального исследования МКЭ в поликристаллических изотропных и текстурированных образцах гексаферритов системы $\text{BaCo}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($\text{Co}_{2-x}\text{Zn}_x\text{-W}$) показали, что в случае изотропных образцов имеются слабо выраженные аномалии температурных зависимостей МКЭ в окрестностях спин-ориентационных превращений, однако абсолютная величина эффекта не превышает нескольких десятых градуса. В случае же намагничивания текстурированных образцов вдоль направления "трудного" намагничивания при температурах вблизи температур спиновой переориентации величина ΔT может составлять 1.5–1.8 К при намагничивающем поле не более 1 Т, что вполне сопоставимо с результатами, полученными для редкоземельных металлов и их соединений [1–3].

В общем виде выражение для изменения температуры магнетика dT при адиабатическом намагничивании в поле dH имеет вид

$$dT/dH = -(dS/dH)_T / (dS/dT)_H, \quad (1)$$

где S — энтропия кристалла. Окончательное выражение для обратимого МКЭ с учетом констант МКА высшего порядка имеет вид

$$dT = \left[TDB/C_H HMA - (T/C_H)(dM/dT) \cos(\theta - \psi) \right] dH, \quad (2)$$

где $A = 2K_1R_1 + 4K_2R_2 + 6K_3R_3 + MH \cos(\theta - \psi)$, $B = \sum [(dK_i/dT)M - (dM/dT)K_i]P_i$, $D = \sum K_iP_i$, $C_H = C_0 + TB^2/M^2A$, C_0 — решеточная теплоемкость, M — намагниченность кристалла при данной температуре, K_i — константы МКА, θ — угол между направлением намагниченности и осью C , ψ — угол между направлением внешнего поля и осью C .

В выражении (2) первый член в квадратных скобках соответствует анизотропной составляющей МКЭ, а второй учитывает составляющую эффекта за счет парапроцесса. Таким образом, для расчета МКЭ необходимы сведения о температурных зависимостях намагниченности, констант МКА и теплоемкости для конкретного соединения. Кроме того, необходимо предварительно вычислить значения равновесного угла θ для каждой пары значений поля и температуры.

Приведем результаты расчетов МКЭ для одного из соединений системы $\text{BaCo}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 1.38$), для которого имеются данные о поведении $K_i(T)$, полученные на основе нейтронографического исследования диаграммы магнитного состояния и анализа особенностей кривых намагничивания при различных температурах с использованием метода сингулярной точки [4,5].

Из уравнения (2) видно, что при вычислении T - и H -зависимостей МКЭ необходимы значения равновесного угла θ при каждой паре T и H . Зависимости $\theta(T, H)$ представляют собой трансцендентные уравнения, и поэтому получить явную зависимость подынтегрального выражения от H затруднительно. В связи с этим интегрирование (2) проводилось численным методом Гаусса. Функции $M(T)$, $K_i(T)$ и их производные аппроксимировались полиномами с необходимой точностью. В расчетах использовались сведения о температурной зависимости теплоемкости $C_H(T)$, полученные для соединения BaM в [6] и скорректированные с учетом разницы молярного веса гексаферритов M - и W -типов.

На рис. 1,а приведены результаты расчетов температурных зависимостей МКЭ для монокристалла $\text{Co}_{0.62}\text{Zn}_{1.38}\text{-W}$ при различных значениях внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси C кристалла.

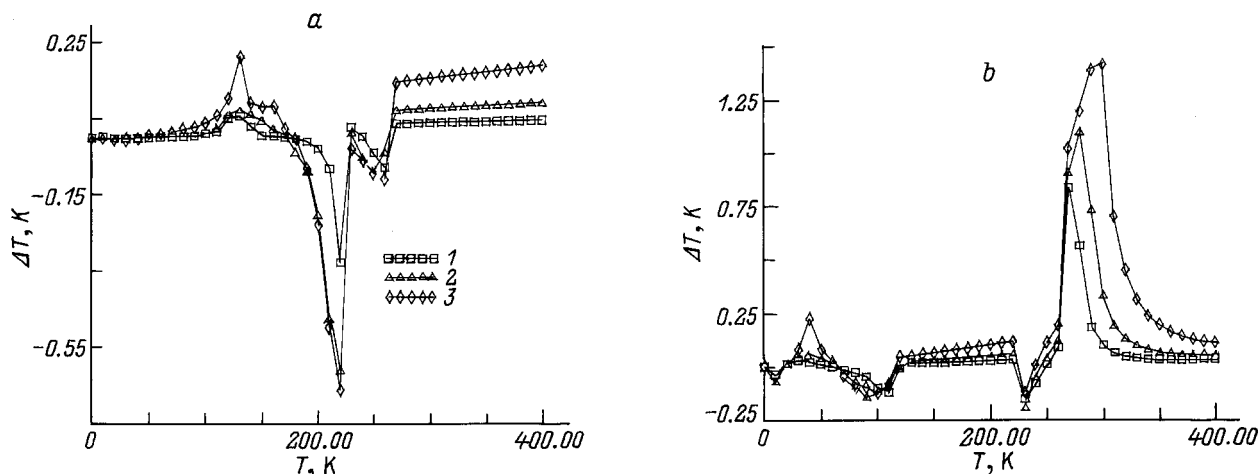


Рис. 1. Температурные зависимости МКЭ монокристалла $\text{BaCo}_{0.62}\text{Zn}_{1.38}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ при намагничивании вдоль гексагональной оси кристалла (а) и при намагничивании в базисной плоскости кристалла (б). H (кОе): 1 — 2, 2 — 4, 3 — 8.

Максимум температурной зависимости МКЭ ΔT при температуре 130 К и минимум при $T = 260$ К соответствует окрестностям спонтанных ориентационных переходов конус–плоскость и плоскость–конус легкого намагничивания соответственно. Глубокий минимум при температуре $T = 220$ К имеет место в температурном интервале, в котором наблюдается максимальная трансформация диаграммы магнитного состояния под действием внешнего поля. Для $T < 200$ К величина критического поля составляет $H_c \approx 6$ кОе. Практическое совпадение температурных зависимостей МКЭ для намагничивающих полей, больших и меньших величины критического поля, указывает на незначительную роль процессов намагничивания первого рода в реализации термомагнитных эффектов. На рис. 1, б показаны температурные зависимости МКЭ для случая поля, приложенного в базисной плоскости. В окрестности спонтанных ориентационных превращений наблюдаются небольшие минимумы, а максимальный положительный эффект наблюдается в области, соответствующей наибольшей трансформации магнитной фазовой диаграммы во внешнем поле. Заметим, что парамагнитная составляющая эффекта суммируется с анизотропной компонентой при намагничивании кристалла в базисной плоскости и вычитается при приложении поля вдоль оси C . Это приводит к некоторому отличию в поведении полевых зависимостей ΔT для различных направлений внешнего поля.

Для поликристалла, изотропного или текстурированного, выражение (2) принимает вид

$$\Delta T = \int P(\psi) \int [TDB/C_H H M A - (T/C_H)(dM/dT) \cos(\theta - \psi)] d\psi dH, \quad (3)$$

где $P(\psi)$ — плотность функции распределения вероятности ориентации осей C отдельных кристаллитов.

На рис. 2 показаны расчетные температурные зависимости МКЭ для монокристалла (кривая 1), текстурированного поликристалла со степенью текстуры $f_t = 0.5$ (кривая 2), а также изотропного поликристаллического образца для случая внутреннего намагничивающего поля $H = 8$ кОе, направленного вдоль гексагональной оси кристалла (кривая 3). Видно, что величина ΔT -эффекта для изотропного поликристалла существенно меньше, чем для монокристалла и ориентированного поликристалла. Наличие определенной степени текстуры сказывается на величине МКЭ лишь для случая значительной дисперсии осей C кристаллитов: при степени текстуры $f_t > 0.7$ кривые $\Delta T(T)$ практически совпа-

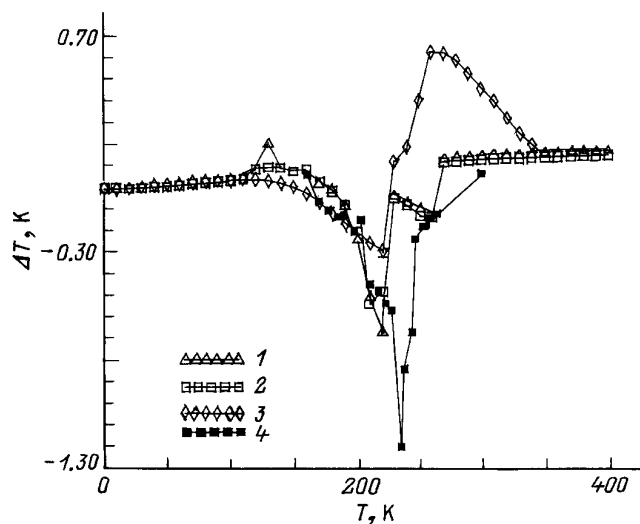


Рис. 2. Температурные зависимости МКЭ для соединения $\text{BaCo}_{0.62}\text{Zn}_{1.38}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ в поле $H = 8$ кОе, направленном вдоль гексагональной оси кристалла. 1 — монокристалл, 2 — текстурированный поликристалл, 3 — изотропный поликристалл, 4 — экспериментальные данные для текстурированного поликристалла, $f_t = 0.7$.

дают с расчетными зависимостями для монокристалла. Кривая 4 на этом же рисунке соответствует результатам экспериментального исследования МКЭ в образце текстурированного поликристаллического гексаферрита $\text{Ba-Co}_{0.62}\text{Zn}_{1.38}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ со степенью текстуры $f_t = 0.7$, внешнее поле $H = 12$ кОе направлено вдоль оси С. Налицо хорошее качественное согласие теории и эксперимента: характерное поведение $\Delta T(T)$ в низкотемпературной части пика МКЭ проявилось при расчете и на опыте, так же как резкий спад и изменение знака после достижения максимума.

Список литературы

- [1] А.С. Андреевко, К.П. Белов, С.А. Никитин, А.М. Тишин. УФН **158**, 4, 554 (1989).
- [2] С.М. Жилияков, Е.П. Найден, Г.И. Рябцев. Изв. вузов. Физика **36**, 10, 63 (1993).
- [3] С.М. Жилияков, Е.П. Найден. ФТТ **36**, 8, 2402 (1994).
- [4] E.P. Naiden et al. Phys. Stat. Sol. (a) **120**, 1, 209 (1990).
- [5] Е.П. Найден, Г.И. Рябцев. Изв. вузов. Физика **33**, 4, 44 (1990).
- [6] P.V.N. Reddy, P. Reddy. J. Phys. Stat. Sol. (a) **22**, 1, 219 (1974).