

Влияние восприимчивости на магнитные фазовые диаграммы ферритмагнетика с магнитной нестабильностью

© Н.П. Колмакова, Р.З. Левитин*, М.Ю. Некрасова

Брянский государственный технический университет,
241035 Брянск, Россия

* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 14 января 1998 г.)

Рассчитаны магнитные фазовые диаграммы двухподрешеточного ферритмагнетика с магнитно-нестабильной подсистемой при учете восприимчивости. Получены аналитические выражения для полей фазовых переходов и критических значений параметров ферритмагнетика. Проанализирована эволюция магнитных фазовых диаграмм с ростом восприимчивости нестабильной подрешетки.

В последние годы большое внимание уделяется изучению как в экспериментальном, так и в теоретическом плане ферритмагнетиков, одна из магнитных подрешеток которых является магнитно-нестабильной, т.е. в магнитном поле претерпевает метамагнитный переход из слабомагнитного в сильномагнитное состояние. Магнитные фазовые диаграммы (МФД), а следовательно, и кривые намагничивания таких ферритмагнетиков значительно сложнее и интереснее, чем в случае обычных ферритмагнетиков со стабильными подрешетками, так как в них наряду с фазовыми переходами второго рода в неколлинеарную фазу возникают метамагнитные переходы в нестабильной подсистеме и возможна интерференция двух типов переходов. В работе [1] были рассчитаны все возможные МФД и представлены возможные типы кривых намагничивания таких ферритмагнетиков, однако теоретическое исследование было проведено в пренебрежении магнитными восприимчивостями. Между тем важность учета восприимчивости следует хотя бы из того известного факта, что даже в простом ферритмагнетике в зависимости от величины восприимчивости в коллинеарной фазе формируются различные МФД: неколлинеарная фаза либо возникает, либо нет. Существующий достаточно обширный экспериментальный материал для интерметаллических соединений типа фаз Лавеса $YR(\text{CoAl})_2$, зонная d -подсистема которых является магнитно-нестабильной и которые могут служить примером рассматриваемого класса ферритмагнетиков, также показывает необходимость учета восприимчивости нестабильной подсистемы. Кривые намагничивания соединений $YR(\text{CoAl})_2$ с разными редкими землями (РЗ) и разной концентрацией алюминия были измерены в полях до 100 Т, они имеют весьма разнообразный вид [2–4]; в частности, для Tm-соединения на кривой намагничивания наблюдались два метамагнитных перехода с неколлинеарной фазой между ними [5]. Для интерпретации всех этих экспериментальных данных нами был разработан численный метод, в котором свойства нестабильной подрешетки описываются с помощью экспериментальной кривой намагничивания базового, без РЗ, соединения

$Y(\text{CoAl})_2$. Этот подход позволил весьма успешно интерпретировать магнитные свойства рассматриваемых соединений [1–5]. Однако ответ на вопросы, приводит ли учет восприимчивости к появлению новых по сравнению с приведенными в [1] МФД; как зависят от восприимчивости поля фазовых переходов и критические значения параметров ферритмагнетика, требует аналитической формы рассмотрения. Этому посвящена данная работа.

1. Модель

Рассмотрим двухподрешеточный ферритмагнетик, одна магнитная подсистема которого претерпевает метамагнитный переход в поле H_m из слабомагнитного состояния (w) со спонтанной намагниченностью m и магнитной восприимчивостью χ_w в сильномагнитное состояние (s) с намагниченностью в точке метамагнитного перехода M и магнитной восприимчивостью χ_s . Эта магнитная подсистема находится в эффективном поле вследствие наличия отрицательного обменного взаимодействия, характеризуемого обменным параметром λ_{12} , $H_{\text{eff}} = H + \lambda_{12}M_2$, где M_2 — магнитный момент второй подрешетки,

$$M_1 = \begin{cases} m + \chi_w H_{\text{eff}}, & H_{\text{eff}} < H_m, \\ M + \chi_s (H_{\text{eff}} - H_m), & H_{\text{eff}} > H_m. \end{cases} \quad (1)$$

Вторая магнитная подсистема для простоты характеризуется постоянным по величине магнитным моментом M_2 , поскольку наши численные расчеты показали, что для низких температур это является хорошим приближением. Будем решать задачу в рамках теории молекулярного поля.

Термодинамический потенциал рассматриваемого ферритмагнетика может быть записан следующим образом:

$$G = F - H(M_1 + M_2) + \lambda M_1 M_2, \quad \lambda = |\lambda_{12}|, \quad \lambda_{12} < 0. \quad (2)$$

Здесь F — термодинамический потенциал нестабильной подсистемы, находящейся в эффективном поле, который различается для слабомагнитного и сильномагнитного состояний. Используя термодинамическое соотношение $F = \int_0^{M_1} H_{\text{eff}}(M_1) dM_1$ и кривую намагничивания нестабильной подрешетки (1), получим

$$F_w = \chi_w H_{\text{eff}}^2 / 2 = (M_1 - m)^2 / 2\chi_w,$$

$$F_s = -\chi_w H_m^2 / 2 + H_m(M - m) + \chi_s (H_{\text{eff}}^2 - H_m^2) / 2$$

$$= -\chi_w H_m^2 / 2 + H_m(M - m) + (M_1 - M)^2 / 2\chi_s. \quad (3)$$

В неколлинеарных фазах величина M_1 и собственная энергия нестабильной подрешетки, определяемая ею, равны этим величинам в соответствующих ферримагнитных фазах в полях фазовых переходов, поскольку, как известно [6], в приближении молекулярного поля величины магнитных моментов подрешеток в неколлинеарной фазе не зависят от величины поля.

Выясним, какой вклад вносит восприимчивость нестабильной подрешетки в формирование магнитных фазовых диаграмм. В соответствии с номенклатурой, введенной в [1], перечислим все возможные состояния рассматриваемого ферримагнетика: AW — ферримагнитная слабая фаза, AS — ферримагнитная сильная фаза, FW — ферромагнитная слабая фаза, FS — ферромагнитная сильная фаза, NW — неколлинеарная слабая фаза, NS — неколлинеарная сильная фаза. Будем определять области существования этих фаз и поля переходов между ними в приближении молекулярного поля, анализируя знаки и величины эффективных полей, действующих на подрешетки, и выбирая фазу с минимальным значением равновесного термодинамического потенциала. В [1] МФД представлены в координатах: магнитное поле H , концентрация атомов стабильной подсистемы t . Варьируя концентрацию t , т.е. величину магнитного момента стабильной подсистемы M_2 , можно изменять эффективное поле, действующее на нестабильную подсистему, и реализовать различные участки МФД. В зависимости от величины обменного взаимодействия в этих координатах были получены четыре МФД, которые существенно различаются по своей топологии. Проводя рассмотрение МФД с учетом восприимчивости, следует ответить на следующие вопросы: являются ли прежними основные типы МФД; как изменяются критерии по обменному параметру для классификации МФД; как зависят от восприимчивостей χ_w и χ_s поля фазовых переходов и критические значения t (или M_2). При рассмотрении будем придерживаться терминологии работы [1], в которой фиксированными параметрами нестабильной подсистемы являются поле метамагнитного перехода H_m , спонтанная намагниченность в слабой фазе m и намагниченность в сильной фазе в точке метамагнитного перехода M .

2. Магнитные фазовые диаграммы при учете восприимчивости

В зависимости от величины обменного взаимодействия МФД характеризуются различной последовательностью исходных состояний (при $H = 0$) при возрастании M_2 . Поэтому, как и было сделано в [1], будем проводить классификацию МФД, используя в качестве критерия обменный параметр λ , и рассмотрим влияние восприимчивости по отдельности для каждого характерного интервала λ .

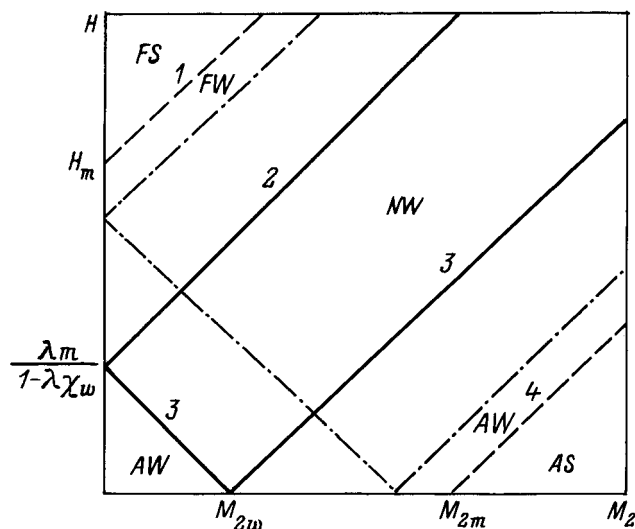


Рис. 1. Магнитная фазовая диаграмма ферримагнетика с нестабильной подсистемой в случае слабого обмена $\lambda < H_m/M$. Фазовые переходы первого и второго рода показаны штриховыми и сплошными линиями соответственно. 1 — H_{m1} , 2 — H_{2w} , 3 — H_{1w} , 4 — H_{m2} . Фазовые переходы второго рода для больших значений восприимчивостей изображены штрихпунктирными линиями.

1) Слабый обмен. В случае слабого взаимодействия, когда

$$\lambda < H_m/M, \quad (4)$$

МФД имеет вид, изображенный на рис. 1. Поля метамагнитных переходов $FW \leftrightarrow FS$ (H_{m1}) и $AW \leftrightarrow AS$ (H_{m2}) не зависят от восприимчивостей и по-прежнему равны

$$H_{m1} = H_m + \lambda M_2, \quad H_{m2} = \lambda M_2 - H_m. \quad (5)$$

Поля фазовых переходов второго рода $AW \leftrightarrow NW$ (H_{1w}) и $NW \leftrightarrow FW$ (H_{2w}) зависят от χ_w следующим образом:

$$H_{1w} = \lambda \left| \frac{m}{1 - \lambda \chi_w} - M_2 \right|,$$

$$H_{2w} = \lambda \left| \frac{m}{1 - \lambda \chi_w} + M_2 \right|. \quad (6)$$

Точка компенсации по слабомагнитному состоянию M_{2w} также зависит от χ_w и равна

$$M_{2w} = \frac{m}{1 - \lambda \chi_w}. \quad (7)$$

Из формул (5)–(7) видно, что с ростом χ_w M_{2w} приближается к

$$M_{2m} = H_m/\lambda, \quad (8)$$

H_{2w} приближается к H_{m1} , а H_{1w} — к H_{m2} . При значении восприимчивости $\chi_w = (1/\lambda) - (m/H_m)$ эти точки и линии совпали бы, но этого произойти не может, поскольку величина χ_w ограничена условием наличия скачка намагниченности на исходной метамагнитной кривой нестабильной подрешетки

$$\chi_w < \chi_x^{cr} = (M - m)/H_m. \quad (9)$$

Критические поля при χ_w^{cr} на рис. 1 изображены штрихпунктирными линиями. Видно, что МФД и кривые намагничивания с учетом восприимчивости для слабого обмена качественно такие же, как и в пренебрежении ею, изменяются только значения критических полей. Из-за более жесткого ограничения (9) ситуация $\chi_w > 1/\lambda$ не реализуется вообще, и NW появляются всегда при условии $m \neq 0$.

2) Промежуточный обмен. Если λ удовлетворяет условию

$$\frac{H_m}{M} < \lambda < \frac{H_m}{m + \chi_w H_m}, \quad (10)$$

что соответствует ситуации промежуточного обменного взаимодействия, при $H = 0$ появляется точка компенсации для сильномагнитного состояния

$$M_{2s} = \frac{M - \chi_s H_m}{1 - \lambda \chi_s}. \quad (11)$$

МФД значительно усложняется, имея различный вид в зависимости от знака выражения

$$\lambda \frac{(M - \chi_s H_m)^2}{1 - \lambda \chi_s} - \lambda \frac{m^2}{1 - \lambda \chi_w} - 2H_m(M - m) + (\chi_w + \chi_s)H_m^2, \quad (12)$$

и изображена для отрицательного знака этой комбинации параметров ферримагнетика на рис. 2, а для положительного — на рис. 3.

Только от χ_s зависят поля фазовых переходов второго рода $AS \leftrightarrow NS$ (H_{1s}) и $NS \leftrightarrow FS$ (H_{2s})

$$H_{1s} = \lambda \left| M_2 - \frac{M - \chi_s H_m}{1 - \lambda \chi_s} \right|, \\ H_{2s} = \lambda \left| M_2 + \frac{M - \chi_s H_m}{1 - \lambda \chi_s} \right|. \quad (13)$$

Все остальные критические поля и характерные точки, новые по сравнению с МФД для слабого обмена, зависят и от χ_s , и от χ_w . В полях фазовых переходов первого рода $FW \leftrightarrow AS$ (H_{m3}), $AS \leftrightarrow AW$ (H_{m4}), $NW \leftrightarrow AS$ (H_{m5}), $AW \leftrightarrow NS$ (H_{m6}) и $FW \leftrightarrow NS$ (H_{m7}) происходит измене-

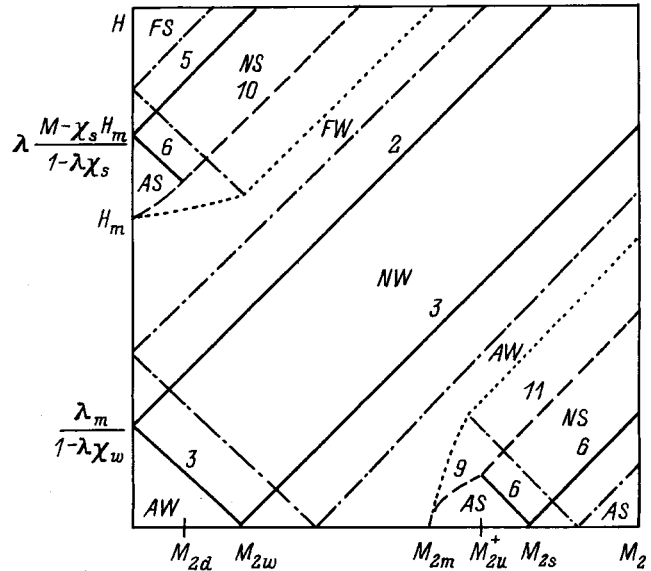


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для случая промежуточного обмена ($\lambda > H_m/M$, выражение (12) отрицательно). 5 — H_{2s} , 6 — H_{1s} , 9 — H_{m4} , 10 — H_{m6} , 11 — H_{m7} . Фазовые переходы первого рода для больших значений восприимчивостей изображены пунктирными линиями. Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

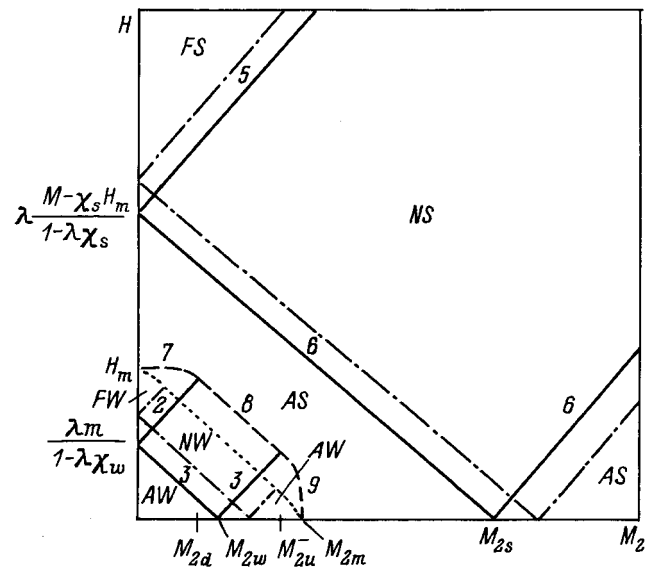


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для случая промежуточного обмена (выражение (12) положительно, $\lambda < H_m/(m + \chi_w H_m)$). 7 — H_{m3} , 8 — H_{m5} . Остальные обозначения те же, что и на рис. 1 и 2.

ние ориентации магнитных моментов обеих подрешеток относительно внешнего поля. Это отличает их от метамагнитных переходов в полях H_{m1} и H_{m2} (5), когда изменяется лишь величина магнитного момента нестабильной подрешетки, а ориентация магнитных моментов

не изменяется,

$$\begin{aligned}
 H_{m3} &= H_m \\
 &+ \frac{(2H_m - \lambda M - \lambda m)M_2 + \chi_s H_m (H_m - \lambda M_2) + \chi_w (\lambda^2 M_2^2 - H_m^2 - 2\lambda M_2 H_m)/2}{M - m - 2M_2 + \chi_w \lambda M_2 - \chi_s (H_m - \lambda M_2)}, \\
 H_{m4} &= \frac{(H_m - \lambda M_2)(M - m) - \chi_s (H_m + \lambda M_2)^2/2 - \chi_w (H_m^2 - \lambda^2 M_2^2)/2}{M + m - 2M_2 + \chi_w \lambda M_2 + \chi_s (H_m + \lambda M_2)}, \\
 H_{m5} &= \lambda \left(\frac{M - \chi_s H_m}{1 - \lambda \chi_s} - M_2 \right) - \left\{ \frac{\lambda}{1 - \lambda \chi_s} \right. \\
 &\times \left[-2H_m (M - m) + \lambda \frac{(M - \chi_s H_m)^2}{1 - \lambda \chi_s} \right. \\
 &\left. \left. - \frac{\lambda m^2}{1 - \lambda \chi_w} + (\chi_w + \chi_s) H_m^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (14) \\
 H_{m6} &= \lambda \left(M_2 + \frac{m}{1 - \lambda \chi_w} \right) + \left\{ \frac{\lambda}{1 - \lambda \chi_w} \right. \\
 &\times \left[2H_m (M - m) - \lambda \frac{(M - \chi_s H_m)^2}{1 - \lambda \chi_s} \right. \\
 &\left. \left. + \frac{\lambda m^2}{1 - \lambda \chi_w} - (\chi_w + \chi_s) H_m^2 \right] \right\}^{1/2}, \\
 H_{m7} &= \lambda \left(M_2 - \frac{m}{1 - \lambda \chi_w} \right) - \left\{ \frac{\lambda}{1 - \lambda \chi_w} \right. \\
 &\times \left[2H_m (M - m) - \lambda \frac{(M - \chi_s H_m)^2}{1 - \lambda \chi_s} \right. \\
 &\left. \left. + \frac{\lambda m^2}{1 - \lambda \chi_w} - (\chi_w + \chi_s) H_m^2 \right] \right\}^{1/2}.
 \end{aligned}$$

Выражения для H_{m3} и H_{m4} выписаны при условии, что $\chi_w < 1/\lambda$, $(M - m)/H_m$, $\chi_s < 1/\lambda$.

Критические значения M_2 на диаграммах, приведенных на рис. 2, 3, равны

$$\begin{aligned}
 M_{2u}^{\pm} &= \frac{1}{2} \left(\frac{M - \chi_s H_m}{1 - \lambda \chi_s} + \frac{m}{1 - \lambda \chi_w} \right) \\
 &\pm \frac{1}{2\lambda} \left\{ \frac{\lambda}{1 - \lambda \chi_w} \left| 2H_m (M - m) - \lambda \frac{(M - \chi_s H_m)^2}{1 - \lambda \chi_s} \right. \right. \\
 &\left. \left. + \frac{\lambda m^2}{1 - \lambda \chi_w} - (\chi_w + \chi_s) H_m^2 \right| \right\}^{1/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{2d} &= \frac{1}{2} \left(\frac{M - \chi_s H_m}{1 - \lambda \chi_s} - \frac{m}{1 - \lambda \chi_w} \right) \\
 &- \frac{1}{2\lambda} \left\{ \frac{\lambda}{1 - \lambda \chi_w} \left| 2H_m (M - m) - \lambda \frac{(M - \chi_s H_m)^2}{1 - \lambda \chi_s} \right. \right. \\
 &\left. \left. + \frac{\lambda m^2}{1 - \lambda \chi_w} - (\chi_w + \chi_s) H_m^2 \right| \right\}^{1/2}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Движение критических полей с увеличением χ_w и χ_s показано на рис. 2, 3 штрихпунктирными линиями для фазовых переходов второго рода и пунктирными линиями для фазовых переходов первого рода. Таким образом, при фиксированном значении обменного параметра $\lambda > H_m/M$, когда МФД имеет вид, изображенный на рис. 2, учет восприимчивостей χ_m и χ_s при достаточной величине их приводит к схлопыванию линий H_{2w} и H_{m6} , H_{1w} и H_{m7} и появлению линии H_{m5} , при этом фазовая диаграмма имеет вид, представленный на рис. 3. Это происходит в тот момент, когда выражение (12) изменяет знак. Когда оно равно нулю, поле $H_{m3} = H_m$, а поле H_{m4} описывается уравнением $M_2 = M_{2m}$. Отметим, что такие уравнения получаются при анализе полных выражений для H_{m3} , H_{m4} ; в (14) приведены лишь главные члены. Подчеркнем еще раз, что изменение знака выражения (12) и переход от МФД, приведенной на рис. 2, к МФД, представленной на рис. 3, возможны как за счет роста χ_w , так и за счет роста χ_s . Дальнейший рост χ_w и χ_s приводит к уменьшению областей существования NW, FW и AW (между M_{2w} и M_{2m}), как это показано на рис. 3, но исчезнуть эти области могут только при увеличении обменного взаимодействия, но не за счет восприимчивости χ_w , которая для промежуточного обмена (см. (10)) ограничена соотношением $\chi_w < (1/\lambda) - (m/H_m)$.

3) С и л ь н ы й о б м е н. При $\lambda > H_m/(m + \chi_w H_m)$, что соответствует ситуации сильного обмена, области NW, FW и AW (между M_{2w} и M_{2m}) на рис. 3 исчезают, и появляется линия фазового перехода AW \leftrightarrow AS H_{m2} (5). Остальная часть МФД имеет тот же вид, что и представленная на рис. 3, с той же эволюцией состояний при возрастании χ_s .

Таким образом, учет восприимчивости нестабильной подрешетки двухподрешеточного ферритмагнетика не приводит к изменению вида магнитных фазовых диаграмм, рассчитанных в пренебрежении ею, если только $\chi_s < 1/\lambda$. Более того, разделение на ситуации слабого, промежуточного и сильного обменного взаимодействия практически не зависит от восприимчивости. Это и понятно, поскольку от восприимчивости не зависит спектр исходных состояний ферритмагнетика для различных величин магнитного момента стабильной подрешетки M_2 , который и определяет градацию величин обменного взаимодействия. Однако в случае промежуточного обменного взаимодействия то, какая из МФД (приведенная на рис. 2 или на рис. 3) будет иметь место, от восприимчивостей зависит весьма сильно. Причем переход

от одной МФД к другой при фиксированном значении обменного параметра λ возможен за счет увеличения как χ_w , так и χ_s . Обе восприимчивости сильно ограничивают область существования МФД, приведенной на рис. 2. Большая величина χ_s качественно изменяет МФД, неколлинеарная фаза не возникает, и перемагничивание ферромагнетика осуществляется за счет χ_s . Отметим, что учет размазанности метамагнитного перехода по некоторому интервалу полей, которая, например, может быть обусловлена неоднородностью образца, приводит к единственному результату — размазанности всех метамагнитных переходов, при которых нестабильная подрешетка не изменяет своей ориентации относительно внешнего поля, по такому же интервалу полей. Нелинейность кривой намагничивания нестабильной подсистемы, как показали наши численные расчеты [1–5], приводит к соответствующим нелинейностям кривых намагничивания ферромагнетика в коллинеарных фазах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 96-02-16373) и ИНТАС–РФФИ (проект 96-IN-RU-641).

Список литературы

- [1] I.S. Dubenko, N.P. Kolmakova, R.Z. Levitin, A.S. Markosyan, A.K. Zvezdin. *J. Magn. Magn. Mater.* **153**, 207 (1996).
- [2] Т. Гото, И.С. Дубенко, Н.П. Колмакова, К. Коуи, Р.З. Левитин, М.Ю. Некрасова. *ФТТ* **38**, 4, 1037 (1996).
- [3] Т. Гото, И.С. Дубенко, Н.П. Колмакова, К. Коуи, Р.З. Левитин, А.С. Маркосян, М.Ю. Некрасова. *ФММ* **82**, 4 (1997).
- [4] M.I. Bartashevich, T. Goto, I.S. Dubenko, N.P. Kolmakova, S.A. Kolonogii, R.Z. Levitin, A.S. Markosyan. *Physica B*, in press (1998).
- [5] P.E. Brommer, I.S. Dubenko, J.J.M. Franse, F. Kayzel, N.P. Kolmakova, R.Z. Levitin, A.S. Markosyan, A.Yu. Sokolov. *Phys. Lett.* **A189**, 253 (1994).
- [6] К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева, Р.З. Левитин. *Ориентационные переходы в резкоземельных магнетиках*. Наука, М. (1979). 317 с.