

УДК 538.245

©1995

## ВЛИЯНИЕ КОНСТАНТЫ $K_2$ НА ОДНОРОДНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕКТОРА НАМАГНИЧЕННОСТИ В КУБИЧЕСКОМ МАГНЕТИКЕ ( $K_1 < 0$ ), С КОМБИНИРОВАННОЙ НАВЕДЕННОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

*И.В.Владимиров, Р.А.Дорошенко*

Отдел физики Уфимского научного центра Российской академии наук, 450065, Уфа, Россия

(Поступила в Редакцию 4 апреля 1994 г.)

Рассмотрена роль константы  $K_2$  в спин-переориентационных фазовых переходах, обусловленных наличием в кубическом кристалле комбинированной наведенной анизотропии. Полученные фазовые диаграммы продемонстрировали роль константы  $K_2$  в многообразии спин-переориентационных фазовых переходов, обусловленных наличием в кубическом кристалле комбинированной наведенной анизотропии. Показано, что при небольших значениях параметра  $q = K_2/|K_1|$  уменьшаются (по сравнению с  $q = 0$ ) области устойчивости угловых фаз типа  $\Phi_{\langle 111 \rangle}^<$  и увеличивается область устойчивости фазы  $\Phi_{[1\bar{1}0]}$ . При  $q = 2$  появляются новые угловые фазы типа  $\Phi_{\langle 110 \rangle}^<$ , которые при некоторых значениях  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  соответствуют наименьшему значению энергии анизотропии.

Исследование спин-переориентационных фазовых переходов (СПФП) в пластинках и пленках ферритов-гранатов выявило существенную роль наведенной магнитной анизотропии. При этом наведенная анизотропия в ряде случаев может быть представлена как комбинация двух одноосных составляющих <sup>[1,2]</sup>. Ранее были рассмотрены СПФП в кубических кристаллах с комбинированной наведенной анизотропией (КНА), состоящей из двух одноосных компонент <sup>[3,4]</sup>. Наряду с параметрами КНА на ориентацию вектора намагниченности существенное влияние оказывают величины констант кубической анизотропии  $K_1$  и  $K_2$ . При этом наиболее интересной, на наш взгляд, областью фазовых диаграмм является область, где константы  $K_1$  и  $K_2$  имеют разный знак, т.е. существует конкуренция кубических констант.

Исследование СПФП в кубических кристаллах с КНА при наличии конкуренции кубических констант сильно затруднено прежде всего множеством низкосимметричных ориентационных фаз, а также из-за большого количества изменяемых параметров. Решение данной задачи возможно только с использованием численных расчетов.

В настоящей работе мы рассмотрели влияние второй константы кубической анизотропии  $K_2$  на характер СПФП в кристаллах ( $K_1 < 0$ ) с КНА. КНА представляла комбинацию двух одноосных анизотропий с осями симметрии, совпадающими с кристаллографическими направлениями типа  $\langle 111 \rangle$ .

Плотность энергии кристалла с КНА в сферической системе координат, полярная ось которой совпадает с  $[001]$ , а азимутальный угол  $\varphi$  откладывается от  $[100]$ , имеет вид

$$e_c = -\sin^2 \theta \left[ (1/4) \sin^2 \theta \sin^2 2\varphi + \cos^2 \theta \right] + (1/4)q \sin^4 \theta \cos^2 \theta \sin^2 2\varphi + e_{\text{CIA}},$$

$$e_{\text{CIA}} = -(1/3) \sin^2 \theta \sin 2\varphi (\gamma_1 + \gamma_2) - (\sqrt{2}/3) \sin 2\theta \sin(\varphi + \pi/4) (\gamma_1 - \gamma_2),$$

где  $\theta, \varphi$  — полярный и азимутальный углы,  $e_{\text{CIA}}$  — плотность энергии КНА,  $\gamma_1 = K_{u1}/|K_1|$ ,  $\gamma_2 = K_{u2}/|K_1|$ ,  $q = K_2/|K_1|$ ,  $K_1, K_2$  — первая и вторая константы кубической анизотропии,  $K_{u1}, K_{u2}$  — константы составляющих КНА с осями симметрии вдоль векторов  $\mathbf{n}_1 \parallel [111]$  и  $\mathbf{n}_2 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$  соответственно.

Спектр однородных состояний вектора  $\mathbf{M}$  находится из условия минимума энергии анизотропии. Фазовые диаграммы в плоскости  $(\gamma_1 = K_{u1}/|K_1|, \gamma_2 = K_{u2}/|K_1|)$  были получены для следующих значений параметра  $q = K_2/|K_1|$ : 0, 1 и 2.

а)  $q = 0$ . Минимизация  $e_c$  дает следующие равновесные направления намагниченности  $\mathbf{M}$ :

$$\theta = \pi/2, \quad \varphi = -\pi/4, \quad (1)$$

$$\sin 2\theta \left[ (1/4) + (3/4) \cos \theta + (1/3)(\gamma_1 + \gamma_2) \right] + 2(\sqrt{2}/3) \cos 2\theta (\gamma_1 - \gamma_2) = 0,$$

$$\varphi = \pi/4, \quad (2)$$

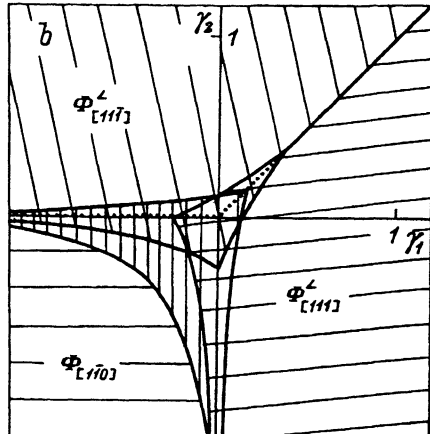
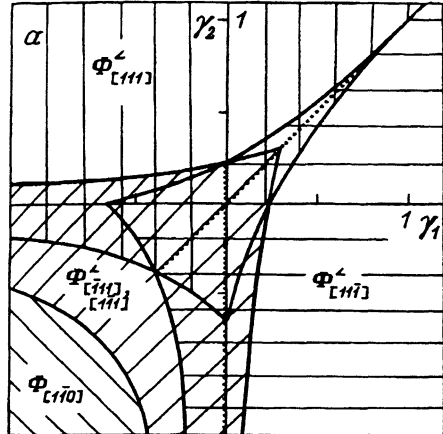
$$-\sin 2\theta \left[ (1/2) \sin^2 \theta \sin^2 2\varphi + \cos 2\theta + (1/3)(\gamma_1 + \gamma_2) \sin 2\varphi \right] +$$

$$+ 2(\sqrt{2}/3) \cos 2\theta \sin(\varphi + \pi/4) (\gamma_2 - \gamma_1) = 0,$$

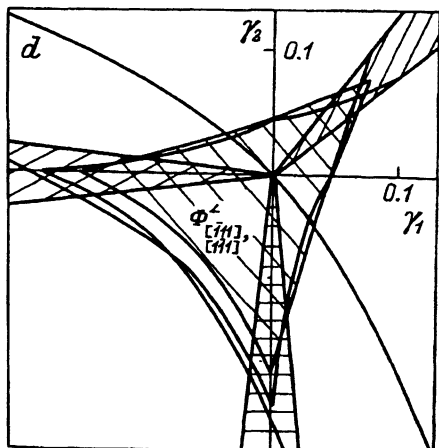
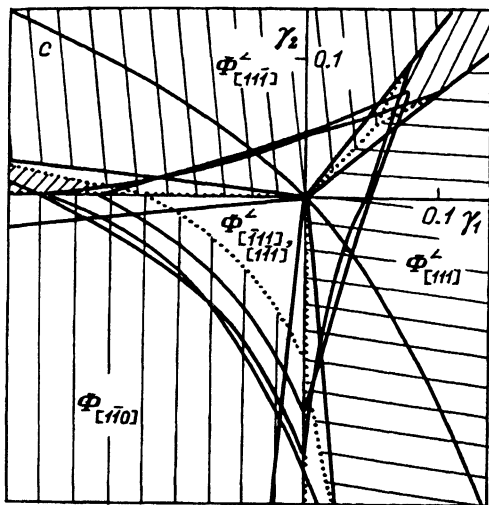
$$-(1/2) \sin 4\theta \sin 4\varphi + (\sqrt{2}/3) \sin 2\theta \cos(\varphi + \pi/4) (\gamma_2 - \gamma_1) -$$

$$-(2/3)(\gamma_1 + \gamma_2) \sin^2 \theta \cos 2\varphi = 0. \quad (3)$$

Условия (1) соответствуют фазе  $\Phi_{[1\bar{1}0]}$ , в которой намагниченность лежит вдоль оси  $[1\bar{1}0]$ , условия (2) — фазам  $\Phi_{[111]}^<$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^<$ , где  $\mathbf{M}$  направлен вдоль искаженных осей  $[111]$  и  $[1\bar{1}\bar{1}]$  соответственно, а (3) — энергетически эквивалентным фазам  $\Phi_{[\bar{1}11]}^<$  и  $\Phi_{[\bar{1}\bar{1}1]}^<$ , в которых  $\mathbf{M}$  лежит вдоль искаженных кубических осей  $[\bar{1}11]$  и  $[\bar{1}\bar{1}1]$ . Области устойчивости фаз  $\Phi_{[111]}^<$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^<$ ,  $\Phi_{[\bar{1}11]}^<$ ,  $\Phi_{[\bar{1}\bar{1}1]}^<$  перекрываются (см. рисунок, а), т.е. имеют место СПФП первого рода. СПФП первого рода между фазами  $\Phi_{[111]}^<$  и  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^<$  происходит вдоль прямой  $\gamma_1 - \gamma_2 = 0$ , между фазами  $\Phi_{[111]}^<$  и  $\Phi_{[\bar{1}11]}^<$  — вдоль прямой  $\gamma_2 \neq 0$ , между фазами  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^<$  и  $\Phi_{[\bar{1}11]}^<$  — вдоль прямой  $\gamma_1 = 0$ . Анализ показывает, что линии потери устойчивости фаз  $\Phi_{[111]}^<$  и  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^<$  и прямая фазового равновесия  $\gamma_1 - \gamma_2 = 0$  пересекаются в одной точке, после чего на линии  $\gamma_1 - \gamma_2 = 0$  имеет место фазовый переход второго рода. Точка  $(3/4, 3/4)$  является критической точкой фазовых переходов первого и второго рода. СПФП

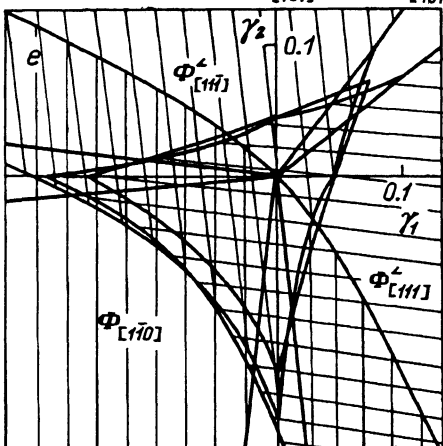


▨  $\Phi_{[111], [1\bar{1}\bar{1}]}^L$



▨  $\Phi_{[110]}^L$  ▩  $\Phi_{[01\bar{1}], [10\bar{1}]}^L$  ▤  $\Phi_{[011], [101]}^L$

▨  $\Phi_{[110]}^L$  ▩  $\Phi_{[01\bar{1}], [10\bar{1}]}^L$  ▤  $\Phi_{[011], [101]}^L$



Ориентационная фазовая диаграмма кубического магнетика с КНА.

Оси симметрии составляющих КНА параллельны  $n_1 \parallel [111]$ ,  $n_2 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$ .  $q$ :  $a - 0$ ,  $b - 1$ ,  $c - e - 2$ . Сплошными кривыми показаны границы областей устойчивости фаз, точками — линии фазового равновесия.  $c$  — области метастабильного состояния фаз не штрихуются.  $d$  — заштрихованы фазы  $\Phi_{[111], [1\bar{1}\bar{1}]}^L$ ,  $\Phi_{[110]}^L$ ,  $\Phi_{[101], [011]}^L$ ,  $\Phi_{[011], [101]}^L$ .  $e$  — заштрихованы фазы  $\Phi_{[111]}^L$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^L$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}0]}^L$ .

между фазами  $\Phi_{[\bar{1}11],[1\bar{1}1]}^{\angle}$  и  $\Phi_{[1\bar{1}0]}$  является переходом второго рода и происходит на кривой  $\gamma_1\gamma_2 = 9/16$ . Отметим, что в областях  $\gamma_1 > 0$  и  $\gamma_2 > 0$  фаза  $\Phi_{[\bar{1}11],[1\bar{1}1]}^{\angle}$  является метастабильной.

b)  $q = 1$ . Характер СПФП при этом значении параметра  $q$  не меняется. Области устойчивости угловых фаз, в которых вектор намагниченности ориентируется вдоль искаженных направлений типа  $\langle 111 \rangle$ , уменьшаются (см. рисунок, *b*). При этом критической точкой СПФП первого и второго рода становится точка  $(3/8, 3/8)$ . СПФП второго рода между  $\Phi_{[1\bar{1}0]}$  и  $\Phi_{[\bar{1}11],[1\bar{1}1]}^{\angle}$  происходит вдоль кривой  $(32/9)\gamma_1\gamma_2 - (2/3)(\gamma_1 + \gamma_2) - 1 = 0$ .

c)  $q = 2$ . Появление новых ориентационных фаз, в которых вектор намагниченности направлен вдоль искаженных направлений типа  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ , существенным образом усложняет фазовую диаграмму. Поэтому разделим фазовую диаграмму на три части (см. рисунок, *c-e*). На всех рисунках сплошными линиями показаны границы областей устойчивости фаз, а точками обозначены линии фазового равновесия. На рисунке, *c* заштрихованы только те участки областей устойчивости фаз, в которых энергия анизотропии принимает наименьшее значение, т.е. области метастабильного состояния фаз не штрихуются. Из рисунка видно, что возможно существование семи фаз, из которых четыре — двукратно вырожденные ( $\Phi_{[111]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}0]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}0]}$ ), три — четырехкратно вырожденные фазы ( $\Phi_{[\bar{1}11],[1\bar{1}1]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[101],[011]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[0\bar{1}\bar{1}],[10\bar{1}]}^{\angle}$ ). СПФП между фазами являются переходами первого рода, за исключением переходов между  $\Phi_{[111]}^{\angle}$  и  $\Phi_{[1\bar{1}0]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^{\angle}$  и  $\Phi_{[1\bar{1}0]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[111]}^{\angle}$  и  $\Phi_{[101],[011]}^{\angle}$ ,  $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}^{\angle}$  и  $\Phi_{[0\bar{1}\bar{1}],[10\bar{1}]}^{\angle}$ , которые до некоторых значений переменных  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  являются переходами первого рода, а выше — СПФП второго рода. Соответственно критические точки переходов первого и второго рода имеют следующие координаты:  $(0.085, 0.110)$ ,  $(0.110, 0.085)$ ,  $(0.05, -0.33)$ ,  $(-0.33, 0.05)$ . На рисунке, *d, e* показаны области устойчивости фаз.

Представленные выше фазовые диаграммы продемонстрировали роль константы  $K_2$  в многообразии СПФП, обусловленных наличием в кубическом кристалле КНА. Показано, что при небольших значениях параметра  $q = K_2/|K_1|$  уменьшаются (по сравнению с  $q = 0$ ) области устойчивости угловых фаз типа  $\Phi_{\langle 111 \rangle}^{\angle}$  и увеличивается область устойчивости фазы  $\Phi_{[1\bar{1}0]}$  (см. рисунок, *b*). При  $q = 2$  появляются новые угловые фазы типа  $\Phi_{\langle 1\bar{1}0 \rangle}^{\angle}$ . Отметим также, что в кубическом кристалле при  $q = 2$  фазы с осями легкого намагничивания  $\langle 110 \rangle$  являются метастабильными. В нашем случае КНА приводит к тому, что при некоторых значениях  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  ориентация вектора намагниченности вдоль искаженной оси  $\langle 110 \rangle$  соответствует наименьшему значению энергии анизотропии.

#### Список литературы

- [1] Веселаго В.Г., Владимиров И.В., Дорошенко Р.А., Сетченков М.С. Препринт ИОФАН СССР № 56 (1987). 61 с.
- [2] Гуменюк-Сычевская Ж.В., Коваленко В.Ф., Чеховой А.Ю. УФЖ **33**, 4, 609 (1988).
- [3] Владимиров И.В., Дорошенко Р.А. ФТТ **33**, 11, 3402 (1991).
- [4] Владимиров И.В., Дорошенко Р.А. ФММ **75**, 3, 19 (1993).