

в направлении оси C куб. Поэтому приведенные выше качественные рассуждения в принципе остаются в силе.

В заключение следует отметить, что при нормальном давлении структура низкотемпературной фазы Ag_2Te имеет более низкую симметрию (моноклинная, ромбическая по различным данным), поэтому примесные уровни четко не разделяются по энергиям.

Таким образом, температурные зависимости проводимости, снятые при сверхвысоких давлениях, позволили качественно установить связь между электрофизическими свойствами и структурой $Ag_{2-s}Te$.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Абрикосов Н. Х., Банкина В. Ф. и др. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе. М.: Наука, 1975. 218 с.
- [2] Горбачев В. В. Полупроводниковые соединения $A_2^I B^VI$. М., 1980. 132 с.
- [3] Березин В. М., Вяткин Г. П., Конев В. Н., Карих П. И. // ФТП. 1984. Т. 18. № 2. С. 312—315.
- [4] Vanus M. D., Finn M. C. // J. Electrochem. Soc.: Sol. State Science. 1969. V. 116. N 1. P. 91—94.
- [5] Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Степанов Т. Н. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16. № 4. С. 240—242.
- [6] Макушин А. П. // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 5. С. 823—831.
- [7] Rahlfs P. // Z. Phys. Chem. Abt. 1936. V. 31. N 1. P. 157.

Челябинский
государственный технический университет

Поступило в Редакцию
29 апреля 1991 г.

УДК 538.245

© Физика твердого тела, том 33, № 11, 1991
Solis State Physics, vol.33, N 11, 1991

МАГНИТНЫЕ ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ КУБИЧЕСКИХ МАГНЕТИКОВ ($K_1 < 0$) С КОМБИНИРОВАННОЙ НАВЕДЕННОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

И. В. Владимиров, Р. А. Дорошенко

Изучено влияние комбинированной наведенной анизотропии (КНА) на спектр однородных состояний вектора намагниченности в монокристаллических средах с кубической анизотропией $K_1 < 0$. КНА представляла собой комбинацию двух одноосных анизотропий с осями симметрии, совпадающими с кристаллографическими направлениями типа $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$. Наличие комбинированной анизотропии в реальных монокристаллах определяется сосуществованием различных механизмов наведения: условиями роста и внешними упругими напряжениями, термоотжигом и фотоиндуцированными изменениями, другими комбинациями.

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

$$E_A = K_1 (1/4 \cdot \sin^2 \theta \sin^2 2\varphi + \sin^2 \theta - \sin^4 \theta) + E_{КНА}, \quad (1)$$
$$E_{КНА} = K_u^1 (1 - (\alpha \cdot n_1)^2) + K_u^2 (1 - (\alpha \cdot n_2)^2),$$

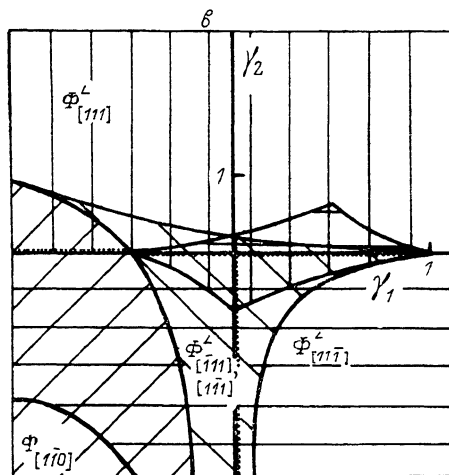
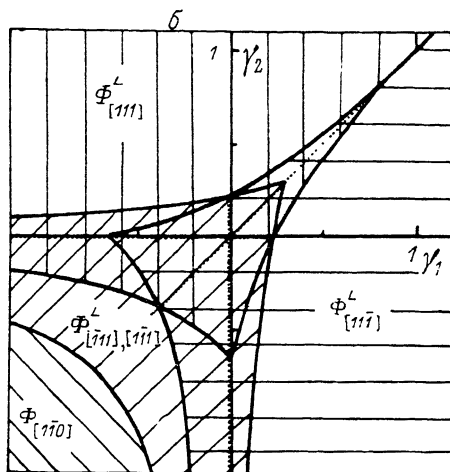
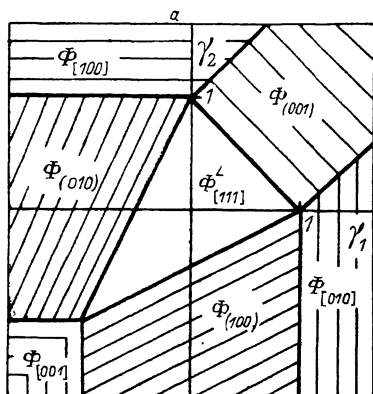
где θ , φ — полярный и азимутальный углы соответственно; $E_{КНА}$ — плотность энергии КНА; K_1 — первая константа кубической анизотропии; K_u^1 , K_u^2 — константы составляющих КНА с осями симметрии вдоль векторов n_1 и n_2 соответственно; α — вектор направляющих косинусов M .

Спектр однородных состояний вектора M находится из условия минимума энергии анизотропии. Фазовые диаграммы в плоскости $(\gamma_1 = K_u^1 / |K_1|, \gamma_2 = K_u^2 / |K_1|)$ были получены для следующих комбинаций состав-

ляющих КНА: а) $n_1 \parallel [100]$, $n_2 \parallel [010]$; б) $n_1 \parallel [111]$, $n_2 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$; в) $n_1 \parallel [001]$, $n_2 \parallel [111]$.

В случае «а» выражение для плотности энергии КНА имеет вид

$$E_{КНА} = -\sin^2 \theta (\gamma_1 \sin^2 \varphi + \gamma_2 \cos^2 \varphi).$$



Ориентационные фазовые диаграммы кубического магнетика с комбинированной наведенной анизотропией.

Оси симметрии составляющих КНА параллельны: $n_1 \parallel [100]$, $n_2 \parallel [010]$ (а); $n_1 \parallel [111]$, $n_2 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$ (б); $n_1 \parallel [001]$, $n_2 \parallel [111]$ (в). Сплошными кривыми показаны границы областей устойчивости фаз, точками — линии фазового равновесия.

Минимизируя выражение для плотности энергии анизотропии (1), получим равновесные направления вектора намагниченности.

$$\theta = 0, \quad (2)$$

$$\theta = \pi/2, \quad \varphi = 0, \quad (3)$$

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

$$\cos 2\theta = -\gamma_1, \quad \varphi = 0, \quad (5)$$

$$\cos 2\theta = -\gamma_2, \quad \varphi = \pi/2, \quad (6)$$

$$\theta = \pi/2, \quad \cos 2\varphi = \gamma_2 - \gamma_1, \quad (7)$$

$$\sin^2 \theta = 2/3 + (\gamma_1 + \gamma_2)/3, \quad \cos 2\varphi = (\gamma_2 - \gamma_1)/\sin^2 \theta. \quad (8)$$

Таким образом, возможно существование семи различных фаз, в трех из которых ($\Phi_{[001]}$, $\Phi_{[100]}$, $\Phi_{[010]}$) M лежит вдоль симметричных направлений типа $\langle 100 \rangle$ (условия (2), (3), (4) соответственно), а в трех других ($\Phi_{[010]}^L$, $\Phi_{[100]}^L$, $\Phi_{[001]}^L$) находится в плоскостях типа (100) (условия (5), (6), (7) соответственно). В фазе $\Phi_{[111]}^L$ вектор M параллелен искаженному направлению

типа $\langle 111 \rangle$. Отметим, что $\Phi_{[100]}$, $\Phi_{[010]}$, $\Phi_{[001]}$ — двукратно, $\Phi_{(100)}^L$, $\Phi_{(010)}^L$, $\Phi_{(001)}^L$ — четырехкратно, $\Phi_{(111)}^L$ — восьмикратно вырожденные фазы.

Области устойчивости и существования рассмотренных выше фаз показаны на рисунке, а. Видно, что они не перекрываются. Таким образом, в отличие от кубического кристалла, где все фазовые переходы являются переходами первого рода, в этом случае возможны СПФП только второго рода.

В случае «б» выражение для плотности энергии КНА имеет вид

$$E_{\text{КНА}} = -1/3 \cdot \sin^2 \theta \sin 2\varphi (\gamma_1 + \gamma_2) - \sqrt{2/3} \sin 2\theta \sin (\varphi + \pi/4) (\gamma_1 - \gamma_2).$$

Минимизация (1) дает следующие равновесные направления М:

$$\theta = \pi/2, \quad \varphi = -\pi/4, \quad (9)$$

$$\sin 2\theta (1/4 + 3/4 \cdot \cos \theta + 1/3 \cdot (\gamma_1 + \gamma_2)) + 2\sqrt{2/3} \cos 2\theta (\gamma_1 - \gamma_2) = 0, \quad \varphi = \pi/4, \quad (10)$$

$$-\sin 2\theta (1/2 \cdot \sin^2 \theta \sin^2 2\varphi + \cos 2\theta + 1/3 \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \sin 2\varphi) + 2\sqrt{2/3} \cos 2\theta \sin (\varphi + \pi/4) (\gamma_2 - \gamma_1) = 0,$$

$$-1/2 \cdot \sin 4\theta \sin 4\varphi + \sqrt{2/3} \sin 2\theta \cos (\varphi + \pi/4) (\gamma_2 - \gamma_1) - 2/3 \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \sin^2 \theta \cos 2\varphi = 0. \quad (11)$$

Условия (9) соответствуют фазе $\Phi_{[1\bar{1}0]}$, в которой намагниченность лежит вдоль направления $[1\bar{1}0]$, условия (10) — фазам $\Phi_{[111]}$, $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$, в которых М направлен вдоль искаженных осей $[111]$ и $[1\bar{1}\bar{1}]$ соответственно, а (11) — энергетически эквивалентным фазам $\Phi_{[\bar{1}11]}$ и $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$, в которых М лежит вдоль искаженных кубических направлений $[\bar{1}11]$ и $[1\bar{1}\bar{1}]$. Области устойчивости фаз $\Phi_{[111]}$, $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$, $\Phi_{[\bar{1}11]}$, $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$ перекрываются (см. рисунок, б), т. е. имеет место СПФП первого рода. Кривые фазового равновесия определяются из равенства свободных энергий фаз. 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 $\Phi_{[\bar{1}11]}$, $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$ — вдоль прямой $\gamma_2 = 0$, между фазами $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$ и $\Phi_{[\bar{1}11]}$, $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$ — 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. Переход между фазами $\Phi_{[1\bar{1}0]}$ и $\Phi_{[\bar{1}11]}$, $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$ является СПФП второго рода и происходит на кривой $\gamma_1 \gamma_2 = 9/16$.

В случае в) выражение для плотности энергии КНА имеет вид

$$E_{\text{КНА}} = \sin^2 \theta (\gamma_1 - 1/3 \cdot \gamma_2 \sin 2\varphi) - \sqrt{2/3} \gamma_2 \sin 2\theta \sin (\varphi + \pi/4).$$

Минимизация (1) дает следующие равновесные направления М:

$$\theta = \pi/2, \quad \varphi = -\pi/4, \quad (12)$$

$$\sin 2\theta (\gamma_1 - 1/4 - 3/4 \cdot \cos 2\theta) - 1/3 \cdot \gamma_2 (\sin 2\theta + 2\sqrt{2} \cos 2\theta) = 0, \quad \varphi = \pi/4,$$

$$\sin 2\theta (-1/2 \cdot \sin^2 \theta \sin^2 2\varphi - \cos \theta + \gamma_1 - 1/3 \cdot \gamma_2 \sin 2\varphi) - 1/3 \cdot \gamma_2 \cdot 2\sqrt{2} \cos 2\theta \sin (\varphi + \pi/4) = 0, \quad (13)$$

$$1/2 \cdot \sin^4 \theta \sin 4\varphi - 1/3 \cdot \gamma_2 (2 \sin^2 \theta \cos 2\varphi + \sqrt{2} \sin 2\theta \cos (\varphi + \pi/4)) = 0. \quad (14)$$

Условия (12) соответствуют фазе $\Phi_{[1\bar{1}0]}$, в которой вектор М направлен вдоль $[1\bar{1}0]$, условия (13) — фазам $\Phi_{[111]}$ и $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$, в которых М направлен вдоль искаженных кубических осей $[111]$ и $[1\bar{1}\bar{1}]$ соответственно. Условия (14) описывают энергетически эквивалентные фазы $\Phi_{[\bar{1}11]}$ и $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$. Области устойчивости названных фаз показаны на рисунке, в. СПФП

между фазами $\Phi_{[111]}$ и $\Phi_{[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]}$ в интервале значений параметра $\gamma_1 \in [-0, 5; 1]$ является переходом первого рода с линией фазового равновесия $\gamma_2 = 0$, вне этого интервала — переходом второго рода, происходящим на линии $\gamma_2 = 0$. Точки $(-0,5; 0)$ и $(1; 0)$ являются критическими точками переходов первого и второго родов. Переход между фазами $\Phi_{[\bar{1}11]}$ и $\Phi_{[1\bar{1}\bar{1}]}$ и симметричной фазой $\Phi_{[110]}$ является переходом второго рода и происходит на линии $1 + 2\gamma_1 - 4/3 \cdot \gamma_1 \gamma_2 = 0$. СПФП между фазой $\Phi_{[110]}$ и фазами, описываемыми условиями (13), является переходом первого рода с линией фазового равновесия $\gamma_2 = 0$. Переходы между фазами $\Phi_{[111]}$ и $\Phi_{[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]}$, а также $\Phi_{[11\bar{1}]}$ и $\Phi_{[\bar{1}\bar{1}1]}$, $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ являются переходами первого рода с линиями фазового равновесия $\gamma_2 = 0$ и $\gamma_1 = 0$ соответственно.

Таким образом, в отличие от кубического магнетика при рассмотренной сложной анизотропии СПФП могут быть как первого, так и второго рода. Понижение симметрии кубического кристалла, вызванное КНА, приводит к доминированию угловых фаз. Кроме того, КНА делает возможным фазовые переходы, нехарактерные для кристаллов с кубической и одноосной анизотропиями [1] (например, в случае «б» переход между фазами $\Phi_{[1\bar{1}0]}$ и $\Phi_{[\bar{1}\bar{1}1]}$, $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Tomas I., Murtinova L., Kaczer J. // Phys. Stat. Sol. (a). 1983. V. 75. P. 121—127.

Башкирский научный центр
УрО АН СССР
Уфа

Поступило в Редакцию
6 мая 1991 г.

УДК 538.69 : 539.124

© Физика твердого тела, том 33, № 11, 1991
Solid State Physics, vol. 33, N 11, 1991

ФЛУКТУАЦИИ НЕСОРАЗМЕРНОЙ ВОЛНЫ В КРИСТАЛЛАХ Rb_2ZnCl_4

М. П. Трубицын, В. В. Савченко

Возникновение волны атомных смещений $U = A \cos \varphi(z)$ ниже точки T_c перехода параэлектрическая — модулированная фаза приводит к наличию в колебательном спектре несоразмерных кристаллов дополнительных мод, соответствующих осцилляциям амплитуды A и фазы φ несоразмерной дигорсии. К настоящему времени опубликован ряд работ, посвященных изучению флуктуаций A и φ методами радиоспектроскопии [1–3]. Ранее было показано, что вблизи T_c фазовые флуктуации могут приводить к полному (ЯМР в Rb_2ZnBr_4 [4], ЭПР в $ThBr_4$, $ThCl_4$ [5, 6]) либо частичному (ЯМР и ЯКР в Rb_2ZnCl_4 [7, 8]) динамическому сужению линий магнитного резонанса.

В настоящей работе представлены результаты изучения ЭПР ионов Mn^{2+} в кристаллах Rb_2ZnCl_4 , выращенных по методу Чохральского. В процессе измерений регистрировалась низкополевая группа сверхтонких линий $|M_s| = 3/2 \leftrightarrow 5/2$ для ориентации поля H , параллельной оси несоразмерной модуляции a (пространственная группа симметрии парафазы $R\bar{3}m$). При охлаждении ниже $T_c = 302,5$ К зафиксирована трансформация резонансных линий в характерный для одногармонической модуляции квазинепрерывный спектр, ограниченный высокополевой H_ϕ и низкополевой H_s сингулярностями [1]. Температурная зависимость резонансных полей сингулярного спектра представлена на рисунке.