

## МАГНИТОСТРИКЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛА $DyVO_4$

*Б.Г.Вехтер, З.А.Казей, М.Д.Каплан, В.И.Соколов*

В области структурного фазового перехода, обусловленного кооперативным эффектом Яна – Теллера (КЭЯТ), исследованы магнитострикционные свойства кристалла  $DyVO_4$ . Обнаруженные аномалии магнитострикции объясняются в рамках теории КЭЯТ.

В ян-теллеровских (ЯТ) кристаллах магнитные поля оказывают существенное влияние на свойства кристаллической решетки<sup>1</sup>. Прямым проявлением этого эффекта является магнитострикция. В теоретических работах<sup>2, 3</sup> показано, что в кристаллах с КЭЯТ магнитострикция должна быть аномально велика и иметь характерные зависимости от температуры и магнитного поля. Непосредственных измерений магнитострикции ЯТ кристаллов со структурными фазовыми переходами до настоящего времени, однако, не проводилось. В данной работе впервые исследованы полевые и температурные зависимости статической магнитострикции в кристалле  $DyVO_4$  – представителе большого класса редкоземельных соединений со структурой циркона  $RXO_4$  ( $R = Tm, Dy, Tb$ ;  $X = V, P, As$ ), испытывающих при  $T = T_c$  вследствие КЭЯТ низкотемпературные фазовые переходы тетрагональная – орторомбическая фаза.

Согласно данным<sup>4</sup>,  $DyVO_4$  имеет  $T_c = 14$  К; ниже  $T_N = 3$  К в нем наблюдается антиферромагнитное упорядочение ионов  $Dy^{3+}$ . При  $T > T_c$  низжайшими электронными состояниями

ми  $Dy^{3+}$  являются крамерсовы дублеты  $\Gamma_7$  и  $\Gamma_6$ , разделенные щелью  $2\Delta = 9 \text{ см}^{-1}$ . На базе этих состояний гамильтониан кристалла в приближении молекулярного поля имеет вид <sup>5</sup>

$$H = -A\bar{\sigma}_z\sigma_z + \Delta\gamma\sigma_x - h_xS_x - h_yS_y, \quad (1)$$

где  $A$  — параметр молекулярного поля, возникающего из-за корреляции ЯТ искажений,  $\sigma_{z,x}$  — операторы взаимодействия с молекулярным и кристаллическим, а  $S_{x,y}$  — с магнитными полями  $H_i$  ( $h_i = g_i\mu_B H_i$ ), соответственно,  $\gamma$  — фактор вибронной редукции. При записи (1) мы пренебрегли слабым различием  $g$ -факторов для состояний  $\Gamma_7$  ( $g_{\perp} = 9,9$ ) и  $\Gamma_6$  ( $g_{\perp} = 10,1$ ) и малой по сравнению с  $g_{\perp}$  величиной  $g_{\parallel}$  <sup>4, 6</sup>. С помощью гамильтониана (1) для равновесного параметра порядка  $\bar{\sigma}_z$ , определяющего однородную деформацию кристалла  $U$ , можно получить следующее соотношение:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{2}{Z} \left[ \left( A\bar{\sigma}_z - \frac{h}{2} \cos\varphi \right) E_-^{-1} \exp\left(-\frac{h \cos\varphi}{2kT}\right) \text{sh} \frac{E_-}{kT} + \left( A\bar{\sigma}_z + \frac{h}{2} \cos\varphi \right) E_+^{-1} \exp\left(\frac{h \cos\varphi}{2kT}\right) \text{sh} \frac{E_+}{kT} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $Z$  — одноионная статистическая сумма,  $\varphi$  — угол между магнитным полем  $h$  и осью  $a$  в  $ac$ -плоскости кристалла (плоскость (010)) и

$$E_{\pm} = \left[ (A\bar{\sigma}_z \pm \frac{1}{2} h \cos\varphi)^2 + \Delta^2 \gamma^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Из формулы (2) следует, что при  $h = 0$  и  $T < T_c = \Delta\gamma \text{arc th}^{-1}(\Delta\gamma/A)$  возникает отличный от нуля параметр порядка  $\bar{\sigma}_z$ , вызывающий спонтанную деформацию. Причем магнитное поле  $h_{x,y}$ , согласно (2), увеличивает деформацию. В результате этого в  $DyVO_4$  при  $T \gtrsim T_c$  магнитострикция может достигать величин, сравнимых со спонтанной деформацией решетки кристалла, т. е. порядка  $10^{-3}$ .

Магнитострикция ( $\Delta l/l \equiv U$ ) измерялась на монокристаллах  $DyVO_4$  размером  $2 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$  различных партий выращивания в интервале температур  $1,8 - 25 \text{ К}$  емкостным методом <sup>7</sup>. Конструкция установки позволяла измерять продольную магнитострикцию ( $U_{\parallel}$ ) в сверхпроводящем соленоиде до  $50 \text{ кЭ}$  и поперечную ( $U_{\perp}$ ) — в сверхпроводящем магните, выполненном в геометрии катушек Гельмгольца (поля до  $30 \text{ кЭ}$ ).

На рис. 1 приведены зависимости  $U_{\perp}$  от ориентации поля  $H = 10 \text{ кЭ}$  в плоскости (010) при температурах выше и ниже  $T_c$ . Видно, что при  $T > T_c$  величина  $U_{\perp}$  максимальна, когда  $H \parallel [100]$  и близка к нулю для  $H \parallel [001]$  ( $c$ -ось). Экспериментальные данные качественно согласуются с теоретической зависимостью  $U_{\perp}(\varphi)$ , рассчитанной для  $T > T_c$  по формулам (2) и (3) с параметрами  $A = 11,2 \text{ см}^{-1}$ ,  $\Delta = 4,5 \text{ см}^{-1}$  и  $\gamma = 1$ .

В упорядоченной фазе ( $4,2 \text{ К}$ ) стрикция значительно больше по величине, а для направлений  $H$  вблизи  $c$ -оси наблюдается резкий минимум, положение которого зависит от направления вращения поля. На наш взгляд, такое поведение стрикции связано с кристаллографическими "доменами", возникающими в кристаллах  $DyVO_4$  ниже  $T_c$  <sup>8</sup>. Угловая зависимость  $U_{\perp}$  в плоскости (010) свидетельствует о том, что кристалл  $DyVO_4$  становится монодоменным, когда есть небольшая составляющая  $H$  по оси  $[100]$ , и распадается на структурные "домены" при  $H \perp [100]$ . Причиной переориентации "доменов" внешним магнитным полем является высокая анизотропия  $g$ -фактора при  $T < T_c$ :  $g_x = 19,4$  и  $g_y \approx g_z \approx 0,4$  <sup>4</sup>.

Следует отметить, что для четырех исследованных нами кристаллов  $DyVO_4$  наблюдалось существенное различие магнитострикционных эффектов, обусловленных структурными "доменами". Очевидно в каждом из кристаллов характер разбиения на "домены" ниже  $T_c$  определяется такими трудно контролируруемыми факторами как дефекты кристалла, механические напряжения, возникающие при подклейке образца к держателю и его последующем охлаждении, небольшие одноосные нагрузки, обусловленные весом ( $\sim 5 \text{ г}$ ) пластины измерительного конденсатора, и т. п. Существенно при этом, что кристаллы, охлажденные ниже  $T_c$  в магнитном поле  $\sim 20 \text{ кЭ}$ , не остаются "монодоменными" после выключения поля при  $4,2 \text{ К}$ .

Один из исследованных нами кристаллов  $DyVO_4$  оказался почти "монодоменным" ниже  $T_c$  (при  $H = 0$ ). Об этом свидетельствуют изотермы  $U_{\parallel}(H)$  этого образца для  $H \parallel [010]$ ,

показанные на рис. 2. На них "доменная" стрикция проявляется в виде сравнительно небольших скачков в полях порядка 5 кЭ при  $T = 1,8$  и  $4,2$  К. Принципиально важным является тот факт, что  $U_{||}$  значительно возрастает по мере повышения температуры, достигая вблизи 13 К в полях около 40 кЭ величин порядка спонтанной деформации решетки.

Другой особенностью приведенных изотерм  $U_{||}(H)$  является рост вблизи  $T_c$  максимального коэффициента магнитострикции  $D \equiv \partial \bar{\sigma}_z / \partial H = 1/U_0 (\partial U / \partial H)$  ( $U_0$  – магнитострикция насыщения). Теоретический расчет показывает, что при малых, но конечных величинах  $H$  и  $T \rightarrow T_c$  коэффициент  $D$  аномально растет (при  $T = T_c$   $D \rightarrow \infty$ ). Рис. 3, на котором приведены теоретическая и экспериментальная зависимости коэффициента  $D$ , свидетельствует о качественном согласии теории и эксперимента.

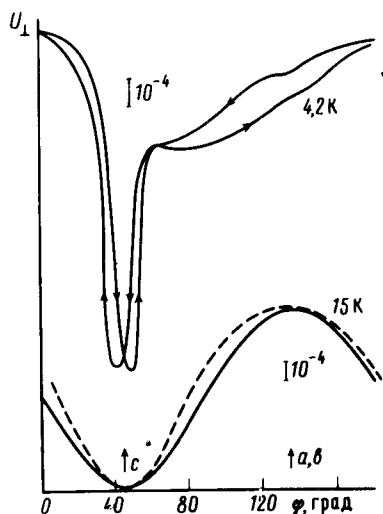


Рис. 1. Зависимость поперечной магнитострикции монокристалла  $DyVO_4$  от ориентации магнитного поля  $H = 10$  кЭ в плоскости (010) выше (15 К) и ниже (4,2 К)  $T_c$ . Сплошная линия – эксперимент; пунктир – теория

Рис. 2. Изотермы продольной магнитострикции для  $H \parallel [010]$

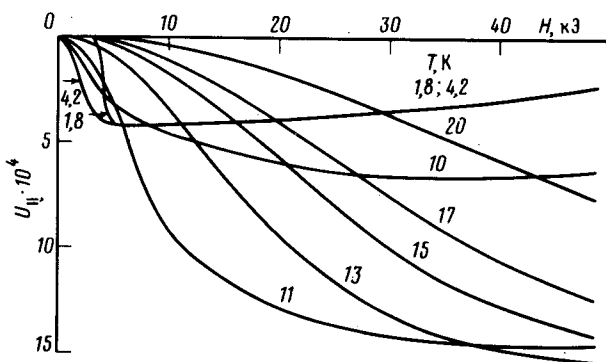


Рис. 2

Рис. 3. Экспериментальная (сплошная линия) и теоретическая (пунктир) зависимости коэффициента магнитострикции от температуры

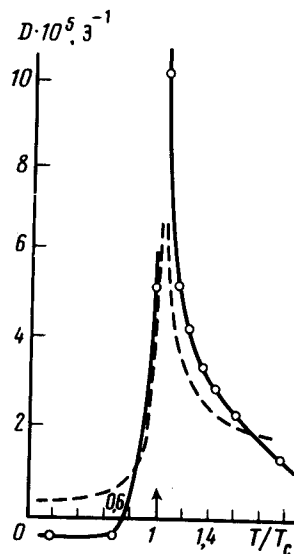


Рис. 3

Таким образом результаты настоящей работы показывают существование в ЯТ кристалле  $DyVO_4$  своеобразных и больших стрикционных эффектов. Поскольку эти эффекты определяются, в основном, конкретным электронным строением магнитных ионов, представляет интерес изучение магнитострикции и других парамагнитных редкоземельных эластиков со структурой циркона.

Авторы благодарят Б.В.Милля за выращивание монокристаллов  $DyVO_4$ , на которых была выполнена экспериментальная часть настоящей работы.

#### Литература

1. Gehring G.A., Gehring K.A. Rep. Progr. Phys., 1975, 38, 1.
2. Вехтер Б.Г., Каплан М.Д. Международная конференция по магнетизму. Тезисы докл., 1973, Москва, 71.

3. Вехтер Б.Г., Каплан М.Д. ЖЭТФ, 1984, 87, 1774.
4. Cooke A.H. et al. Solid State Comm., 1970, 8, 689.
5. Каплан М.Д. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 89.
6. Pytte E. Phys. Rev. B, 1974, 9, 932.
7. Казей З.А., Леванидов М.В., Соколов В.И. ПТЭ, 1982, №1, 196.
8. Kasten A., Becker P.J. Int. J. Magnet., 1973, 5, 157.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Институт химии  
Академии наук Молдавской ССР

Поступила в редакцию  
29 января 1986 г.

---