

## Влияние механических напряжений на магнитоупругие свойства кристалла $\text{TmVO}_4$

© З.А. Казей

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

(Поступила в Редакцию 28 октября 1997 г.)

Экспериментально и теоретически исследовано влияние механических напряжений на магнитоупругие свойства — магнитострикцию и тепловое расширение — ян-теллеровского кристалла  $\text{TmVO}_4$  в области структурного фазового перехода. Показано, что магнитоупругие свойства  $\text{TmVO}_4$  для магнитного поля  $H \parallel [001]$ , не вызывающего изменение доменного состояния образца, достаточно хорошо описываются при учете механических напряжений в кристалле с параметром  $P \sim 0.5 \text{ cm}^{-1}$ . Наоборот, для магнитного поля вдоль направления спонтанной деформации  $[110]$  магнитоупругие свойства обусловлены в основном переориентацией ян-теллеровских доменов и эффектами ближнего порядка. Показано, что "истинная" магнитострикция монокристалла для  $H \parallel [110]$ , расходится в точке фазового перехода  $T_c = 2.15 \text{ K}$  в отсутствие механических напряжений и сильно уменьшается под действием напряжений.

Редкоземельные (РЗ) эластики со структурными фазовыми переходами (ФП) ян-теллеровской природы характеризуются исключительной чувствительностью к различным внешним воздействиям — магнитным и электрическим полям, внешним давлениям и т.д. Это обусловлено наличием в спектре РЗ иона низколежащих квазивыврожденных уровней с большими квадрупольными моментами, на которые можно эффективно воздействовать внешними полями. Влияние магнитного поля на структурные ФП и параметр порядка достаточно подробно исследовано на примере РЗ соединений со структурой циркона [1]. Значительно меньше работ, посвященных исследованию влияния электрического поля и особенно механических напряжений на магнитоупругие характеристики ян-теллеровских (ЯТ) эластиков. Благодаря большой константе электрон-деформационной связи в ЯТ эластике, можно ожидать существенного влияния механических напряжений, по крайней мере для РЗ цирконов, исследованию которых и посвящена настоящая работа.

Хорошо известно, что в редкоземельных соединениях со структурой циркона  $R\text{XO}_4$  ( $R$  — редкоземельный ион,  $X = \text{V}, \text{P}$ ) [2] сильное электрон-фононное взаимодействие, приводящее к структурным ФП, обуславливает большие стрикционные эффекты в этих кристаллах [3,4]. При этом стрикционные характеристики качественно различаются в зависимости от того, усиливает ( $\text{DyVO}_4$ ,  $\text{TbVO}_4$ ,  $\text{TmPO}_4$ ) или подавляет ( $\text{TmVO}_4$ ,  $\text{TmAsO}_4$ ) магнитное поле ЯТ корреляции. Для  $\text{TmVO}_4$  значительная величина стрикции предсказывалась только для ориентации поля вдоль тетрагональной оси при температурах и полях ниже их критических значений, т.е. в искаженной ромбической фазе [3].

При экспериментальном исследовании магнитострикции  $\text{TmVO}_4$  [5] был обнаружен ряд эффектов, которые не описываются в простой модели эффекта Яна-Теллера для изолированного дублета: значительная величина стрикции для ориентации поля вдоль оси  $[110]$ , а также для  $H \parallel [001]$  в полях и при температурах выше

критических. Это означает, что для количественного описания магнитоупругих свойств  $\text{TmVO}_4$  необходимо учитывать примешивание в магнитном поле к основному дублету первого возбужденного синглета и наличие внешних и/или внутренних механических напряжений. В работе [6] были проведены оценки влияния механических напряжений на магнитострикцию  $\text{TmVO}_4$  с привлечением экспериментальных данных для  $H \parallel [110]$ . Однако, на наш взгляд, этот подход не совсем оправдан, так как в этом случае магнитоупругие свойства определяются в основном процессами переориентации ян-теллеровских доменов. С другой стороны можно предполагать, что для ориентации  $H$  вдоль тетрагональной оси изменения доменного состояния кристалла не происходит и магнитоупругие характеристики отражают поведение параметра порядка ФП. Поэтому целью настоящей работы было показать, что совокупность магнитоупругих свойств  $\text{TmVO}_4$  для поля  $H \parallel [001]$  достаточно хорошо количественно описывается в модели, учитывающей механические напряжения и эффекты размагничивания, которые играют существенную роль при низких температурах.

### 1. Образцы и методика измерений

В настоящей работе приведены результаты исследования теплового расширения и магнитострикции монокристаллов  $\text{TmVO}_4$  в области температуры структурного фазового перехода. Кристаллы  $\text{TmVO}_4$  были выращены из раствора в расплаве и имели средний размер  $1 \times 1 \times 2 \text{ mm}$ . Тепловое расширение и магнитострикция определялись соответственно как  $\Delta l(T)/l_0 = [l(T) - l_0]/l_0$  и  $u = \Delta l(T, H)/l_0$ , где  $l_0$  — длина кристалла вдоль направления измерения при  $H = 0$  и  $T = 6 \text{ K}$ , т.е. в неискаженной тетрагональной фазе.

Для измерений использовалась установка с емкостным датчиком деформации, включенным в колебательный контур криогенного генератора (частота  $\sim 1.5 \text{ MHz}$ ) [7]. Температура в интервале  $1.7\text{--}6 \text{ K}$  измерялась угольным

термометром сопротивления. Внешнее магнитное поле создавалось двумя сверхпроводящими магнитными системами, позволявшими прикладывать поле параллельно ( $H \leq 40$  кОе) или перпендикулярно ( $H \leq 25$  кОе) измеряемой деформации.

## 2. Теоретическое рассмотрение

В большинстве теоретических работ расчет магнитоупругих свойств  $\text{TmVO}_4$  проводится на базе функций основного некрамерсова дублета иона  $\text{Tm}^{3+}$ , так как расстояние до первого возбужденного синглета  $\Delta \sim 50 \text{ см}^{-1}$  значительно больше величины  $kT_c = 1.5 \text{ см}^{-1}$ . К структурному переходу тетрагональная-орторомбическая фаза приводит взаимодействие через поле фононов локальных деформаций  $B_{2g}$ -типа. В магнитном поле  $H \parallel [001]$  дублет расщепляется ( $g_{\perp} = 0, g_{\parallel} = 10$ ), что приводит к уменьшению орторомбической деформации  $u(H)$  и критической температуры  $T_c(H)$ . Для каждой температуры  $T < T_c$  существует критическое поле  $H_c(T)$ , в котором деформация обращается в нуль, т.е. восстанавливается тетрагональная фаза;  $H_c \approx 6$  кОе при  $T = 0$  и падает с ростом температуры. Отметим, что на базе некрамерсова дублета стрикция в поперечном поле  $H \perp [001]$  отсутствует, так как матричные элементы зеемановского взаимодействия с  $H_{\perp}$  равны нулю. Поскольку на эксперименте наблюдается значительная стрикция в поле  $H_{\perp}$ , а также в неупорядоченной фазе для  $H \parallel [001]$  ( $T > T_c(H)$  и  $H > H_c(T)$ ), для адекватного описания  $\text{TmVO}_4$  необходимо учитывать примешивание первого возбужденного синглета и наличие внешних и/или внутренних механических напряжений.

На расширенном ( $E+A$ ) базисе одноузельный гамильтониан кристалла  $\text{TmVO}_4$  в приближении молекулярного поля имеет вид

$$H = -A\bar{\sigma}\sigma + \Delta\tau - \bar{P}\sigma - \frac{1}{2}g_{\parallel}\mu_B H_z S_z - \frac{1}{2}g_{\perp}\mu_B (H_x S_x + H_y S_y), \quad (1)$$

где

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$S_z = \begin{pmatrix} 0 & i & 0 \\ -i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$S_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i \\ 0 & -i & 0 \end{pmatrix}.$$

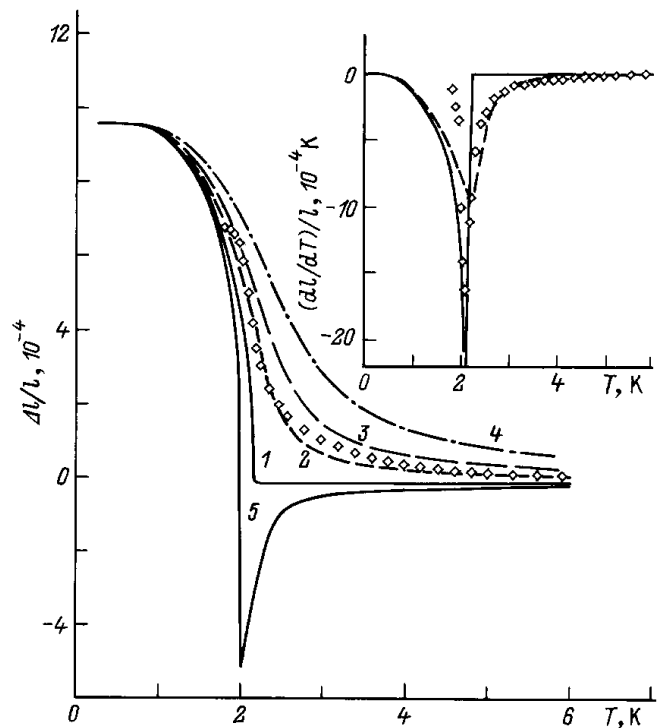
Первый член гамильтониана (1) описывает корреляцию локальных ян-теллеровских искажений  $B_{2g}$ -симметрии, второй — взаимодействие с кристаллическим полем, последние два члена — зеемановское взаимодействие с магнитным полем вдоль и перпендикулярно тетрагональной оси. Для учета внешних и/или внутренних

упругих напряжений в гамильтониан (1) введен член, подобный гамильтониану ян-теллеровских корреляций с параметром  $\bar{P} \equiv [(V_s/C_0)P + \delta]$ , где  $P$  — внешнее давление, индуцирующее деформацию  $B_{2g}$ -симметрии;  $V_s$  — константа электрон-деформационной связи;  $C_0$  — упругий модуль;  $\delta$  — параметр случайных напряжений.

Для количественного описания экспериментов нами были проведены численные расчеты зависимостей  $\bar{\sigma}(H, T)$  при различных температурах и магнитных полях с использованием гамильтониана (1) и значений  $A = 2.1 \text{ К}$ ,  $\Delta = 51 \text{ см}^{-1}$ ,  $g_{\parallel} = 10$  и  $g_{\perp} = 5.3$  [8]. Результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными в предположении, что кристалл находится под действием небольших упругих напряжений, константа  $\bar{P}$  для которых была оценена из данных по тепловому расширению  $\text{TmVO}_4$  в отсутствие поля.

## 3. Экспериментальные результаты

Рассмотрим вначале результаты измерений теплового расширения  $\Delta l(T)/l_0$   $\text{TmVO}_4$  в области ФП. На рис. 1 приведена зависимость  $\Delta l(T)/l_0$  для кристалла  $\text{TmVO}_4$  при  $H = 0$  вдоль оси  $[110]$  — направления спонтанной ромбической деформации  $B_{2g}$ -типа. Видно, что на зави-



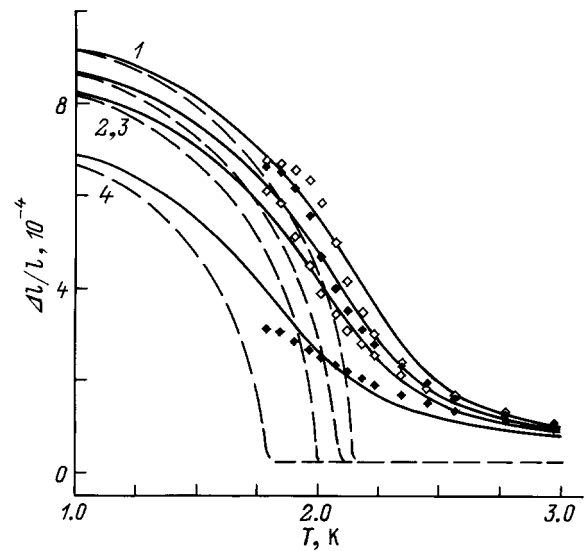
**Рис. 1.** Тепловое расширение кристалла  $\text{TmVO}_4$  вдоль оси  $[110]$  при  $H = 0$ . Точки — эксперимент, линии — расчет при значениях параметра механических напряжений  $\bar{P} = 0$  (1), 0.05 (2), 0.1 (3), 0.2 (4) и  $-0.02 \text{ см}^{-1}$  (5). На вставке показана зависимость коэффициента теплового расширения  $\alpha_c = (dl/dT)/l$  в области фазового перехода при тех же значениях параметра  $\bar{P}$ .

симости  $\Delta l(T)/l_0$  наблюдается аномалия, а критическая температура, определенная по максимуму коэффициента линейного расширения образца  $\alpha_c = [d\Delta l(T)/dT]/l_0$  (см. вставку), составляет  $T_c = (2.15 \pm 0.05)$  К. Это значение хорошо согласуется с  $T_c$ , определенной ранее в работах [8–10] различными методами.

Выше  $T_c$  зависимость  $\Delta l(T)/l_0$  обнаруживает значительный "хвост", свидетельствующий о существовании в  $TmVO_4$  значительных ромбических искажений решетки  $B_{2g}$ -симметрии вплоть до  $T \approx 3T_c$ . Поскольку эффекты ближнего порядка в  $TmVO_4$  незначительны [8], наблюдающийся хвост  $\Delta l(T)/l_0$  связан, на наш взгляд, с деформациями  $B_{2g}$ -симметрии, индуцируемыми механическими напряжениями. Причиной этих деформаций могут быть небольшие одноосные напряжения, как внешние, возникающие в результате подклейки кристалла в измерительном конденсаторе, так и внутренние, образующиеся при росте кристаллов. Действительно, вблизи  $T_c$  даже незначительные механические напряжения, приложенные к образцу, могут существенно влиять на физические свойства ЯТ кристаллов из-за сильного смягчения упругих модулей [10].

Знак аномалии  $\Delta l(T)/l_0$  и ее величина зависят от характера разбиения образца ниже  $T_c$  на структурные (ян-теллеровские) домены. Эти домены представляют собой области, в которых деформации растяжения направлены вдоль эквивалентных в тетрагональной ячейке кристалла осей второго порядка [110] или  $[\bar{1}\bar{1}0]$  ( $a'$  или  $b'$ ,  $a' < b'$ ). Образец, результаты измерений которого представлены на рис. 1, имеет преимущественную ориентацию осей  $b'$  доменов вдоль направления измерения  $\Delta l$ . Так как в отсутствие поля  $H \parallel [110]$  доменное состояние кристалла, по-видимому, не меняется, температурная зависимость  $\Delta l(T)/l_0$  отражает поведение параметра порядка. Отметим, что переориентация доменов сопровождается, как правило, резкими и необратимыми изменениями на кривых теплового расширения и магнитострикции (см. кривую 5 на 1). Таким образом, кривые теплового расширения без поля или в поле  $H \parallel [001]$  позволяют нам провести оценки величины механических напряжений в кристалле  $TmVO_4$ . Из рис. 1 видно, что при увеличении параметра  $\bar{P}$ , характеризующего величину механических напряжений, зависимости  $\Delta l(T)/l_0$  выше  $T_c$  размываются тем сильнее, чем больше  $\bar{P}$ . Для кристалла, данные для которого приведены на рис. 1, механические напряжения составляют  $\bar{P} = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ , эти значения несколько меняются (примерно в 1.5–2 раза) от кристалла к кристаллу. Расчет проводился в предположении однородных напряжений в кристалле; для неоднородных внутренних напряжений  $\delta$ , например, с гауссовским законом распределения, имеет место дополнительное размытие кривых теплового расширения.

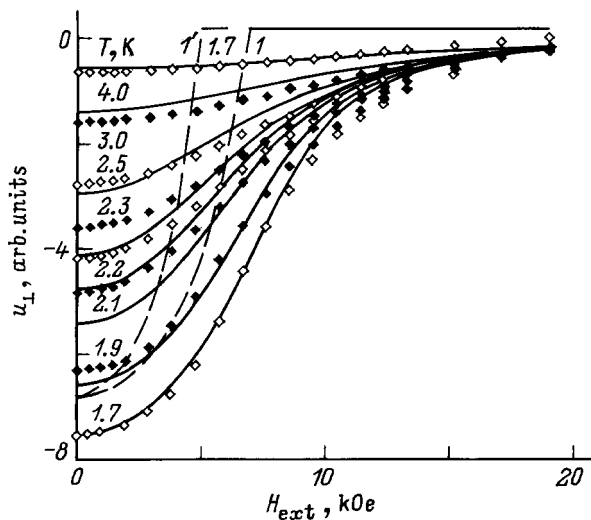
Влияние механических напряжений на подавление структурного ФП внешним магнитным полем  $H \parallel [001]$  иллюстрирует рис. 2. Видно, что поле существенно уменьшает величину деформации решетки  $TmVO_4$  вблизи  $T_c$  и понижает температуру ФП, что согласуется



**Рис. 2.** Тепловое расширение кристалла  $TmVO_4$  вдоль оси [110] в постоянном магнитном поле  $H \parallel [001]$  для образца с размагничивающим фактором  $N \approx 4\pi/3$ . Точки — эксперимент, линии — расчет в отсутствие (штриховые) и при наличии (сплошные) механических напряжений  $\bar{P} = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ .  $H$  (кОе): 1 — 0, 2 — 3, 3 — 4, 4 — 6 кОе.

с данными измерений магнитных [8] и упругих [10] свойств. Из сравнения зависимостей для  $\bar{P} = 0$  (штриховые линии)  $0.05 \text{ cm}^{-1}$  (сплошные линии) для различных значений магнитного поля следует, что механические напряжения обуславливают существенные деформации  $B_{2g}$ -симметрии выше  $T_c(H)$ . Рассчитанные кривые на рис. 2 приведены для реального кристалла  $TmVO_4$  с конечным размагничивающим фактором  $N \approx 4\pi/3$ . Фактически это означает, что в постоянном внешнем поле, в котором проводились измерения, внутреннее поле при понижении температуры уменьшается из-за намагничивания образца и эффект подавления ФП внешним полем ослабляется. Таким образом, основной эффект от механических напряжений сводится к появлению большого "хвоста" теплового расширения при  $T > T_c$ , а от размагничивающих полей — к увеличению по сравнению с  $\bar{P} = 0$  и  $N = 0$  деформации при низких температурах. Учитывая неоднородность механических напряжений в реальном кристалле и неопределенности, связанные с размагничивающими эффектами, согласие экспериментальных и расчетных данных на рис. 2 можно признать вполне удовлетворительным.

Аналогичного влияния механических напряжений можно ожидать и на магнитострикцию  $TmVO_4$ . На рис. 3 показаны изотермы поперечной магнитострикции  $u_{\perp}$  для  $H \parallel [001]$  и  $\Delta l \parallel [110]$ . При  $T < T_c$  на изотермах наблюдается резкое увеличение  $u_{\perp}$ , связанное с восстановлением в магнитном поле  $H_c(T)$  тетрагональной фазы. Отметим, что знаки скачка магнитострикции при увеличении  $H$  и теплового расширения при охлаждении кристалла ниже  $T_c$  различны, т. е. магнитное поле вызывает обратный переход ромбическая–тетрагональная фаза.



**Рис. 3.** Изотермы поперечной магнитострикции  $\text{TmVO}_4$  ( $H \parallel [001]$ ,  $\Delta l \parallel [110]$ ) для образца с размагничивающим фактором  $N \approx 4\pi/3$ . Точки — эксперимент, линии — расчет для  $\bar{P} = 0.1 \text{ cm}^{-1}$  (сплошные) и 0 (штриховые) ( $N = 0$  (I) и  $4\pi/3$  (I')). Изменение с температурой  $u_{\perp}$  при  $H = 0$  отражает тепловое расширение образца.

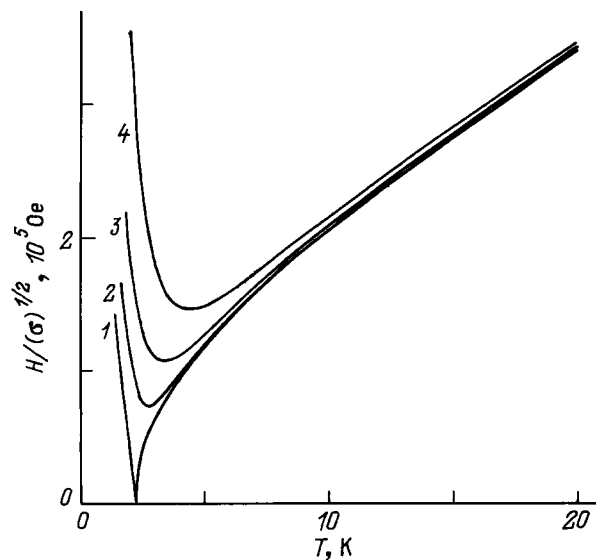
Из рис. 3 видно, что ФП в магнитном поле носит размытый характер и значительно отличается от поведения, которое предсказывает теория для зависимостей  $u_{\perp}(H)$  в отсутствие механических напряжений [3] (см. штриховые кривые I и I' на рис. 3). В частности, для  $T < T_c$  эта теория предсказывает, что коэффициент магнитострикции  $D_{\perp} = du_{\perp}/d(H^2)$  расходится при  $H \rightarrow H_c$  и  $D_{\perp} = 0$  при  $H > H_c$  и  $T > T_c$ . Таким образом, экспериментальные данные как по магнитострикции, так и по тепловому расширению свидетельствуют о существовании в кристалле  $\text{TmVO}_4$  деформаций, индуцируемых механическими напряжениями. Рассчитанные кривые  $u_{\perp}(H)$  с параметром  $\bar{P} = 0.1 \text{ cm}^{-1}$  и размагничивающим фактором  $N \approx 4\pi/3$  достаточно хорошо описывают эксперимент; небольшое расхождение наблюдается только для температур, соответствующих точке перегиба на кривой теплового расширения. Отметим, что размагничивающие эффекты сдвигают критическое поле  $H_c(T)$  для  $T = 1.7 \text{ K}$  примерно на  $2 \text{ kOe}$ , как можно видеть из сравнения кривых I ( $N = 4\pi/3$ ) и I' ( $N = 0$ ) для  $\bar{P} = 0$  на рис. 3. Таким образом, учет упругих напряжений позволяет достаточно хорошо количественно описать как изотермы магнитострикции, так и тепловое расширение  $\text{TmVO}_4$  для ориентации поля  $H \parallel [001]$  при разумных значениях параметра  $\bar{P}$ .

Для поля вдоль оси  $[110]$  магнитоупругие свойства  $\text{TmVO}_4$  определяются в основном переориентацией янтеллеровских доменов. Нами обнаружено сильное влияние магнитного поля  $H \parallel [110]$  на тепловое расширение  $\text{TmVO}_4$ , такое, что охлаждение кристалла в поле  $H \parallel [110] \parallel \Delta l$  уменьшает величину положительной аномалии  $\Delta l(T)/l_0$ , а в поле  $H \parallel [\bar{1}10] \perp \Delta l$  — увеличивает ее, т.е. продольное магнитное поле выстраивает вдоль

направления измерения  $\Delta l$  короткие оси  $a'$ -доменов (для  $\text{TmVO}_4$  ниже  $T_c$   $\chi_{a'} > \chi_{b'}$ ). Продольная стрикция  $\text{TmVO}_4$  для геометрии  $H \parallel [110] \parallel \Delta l$ , достигает значительной величины  $u_{\parallel} \sim 10^{-3}$  в поле  $H = 40 \text{ kOe}$  при  $T \approx 1.7 \text{ K}$ , уменьшается по мере повышения температуры и имеет тенденцию к насыщению ниже  $T_c$ .

Можно указать различные механизмы магнитострикции  $u_{\parallel}$  для  $H \parallel [110]$  в  $\text{TmVO}_4$ . Во-первых, переориентация ЯТ доменов в магнитном поле, причиной которой является анизотропия магнитной восприимчивости  $\chi$  в базисной плоскости, возникающая при ФП. Поскольку величина  $\chi$  в базисной плоскости для  $\text{TmVO}_4$  не велика (при  $4 \text{ K}$   $\chi_a = \chi_b \approx 0.025\chi_c$  [8]), поле переориентации доменов существенно больше, чем, например, в  $\text{DyVO}_4$  [11], и при  $H = 40 \text{ kOe}$  образец еще не достигает монокристаллического состояния. На наш взгляд, именно переориентация ЯТ доменов вносит основной вклад в магнитострикцию  $\text{TmVO}_4$  для  $H \parallel [110]$ , поскольку стрикция велика лишь в области температур, где существует искажение решетки, а зависимость  $u_{\parallel}(H)$  ниже  $T_c$  имеет тенденцию к насыщению, что характерно для доменной магнитострикции.

”Истинная” стрикция  $u_{\parallel}$  монокристаллического кристалла  $\text{TmVO}_4$  для  $H \parallel [110]$  возникает лишь при учете смешивания дублета с возбужденным синглетным состоянием, расположенным на расстоянии  $\Delta$ . В работе [6] было показано, что хотя щель  $\Delta = 51 \text{ cm}^{-1}$  достаточно велика, возникающая стрикция  $u_{\parallel} \sim H^2/\Delta(T - T_c)$  должна быть довольно значительной вблизи ФП при  $T \sim T_c = A/k$ . При  $T < T_c$  стрикция резко падает с понижением температуры, поскольку влияние внешнего магнитного поля на деформацию ослабевает по мере усиления внутреннего молекулярного поля. Таким образом, тем-



**Рис. 4.** Температурная зависимость обратного коэффициента магнитострикции  $(D_{\parallel})^{-1/2} = H/(\sigma)^{1/2}$  для  $\text{TmVO}_4$  при  $H \parallel [110]$  в области структурного фазового перехода в отсутствие и при наличии механических напряжений.  $\bar{P} (\text{cm}^{-1})$ : 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.5, 4 — 1.

пературная зависимость "монокристаллической" стрикции  $u_{||}$  прямо противоположна наблюдаемой на эксперименте, что подтверждает вывод относительно обусловленности последней в основном переориентацией ЯТ доменов.

Отстроиться от доменных эффектов на эксперименте довольно сложно, поэтому изучение "истинной" стрикции и влияние на нее механических напряжений возможно исследовать только в тетрагональной фазе при  $T > T_c$ . Известно, что при структурном фазовом переходе ян-теллеровской природы коэффициент магнитострикции  $D_{||} = du_{||}/d(H^2)$  вдоль направления спонтанной деформации расходится в точке ФП. Однако на эксперименте эту расходимость никогда наблюдать не удастся, и одна из причин, по-видимому, обусловлена влиянием механических напряжений. Действительно, наши расчеты показывают, что при наличии механических напряжений значение коэффициента магнитострикции  $D_{||}$  для  $TmVO_4$  вблизи критической температуры существенно уменьшается (рис. 4). Это уменьшение наблюдается для большинства РЗ цирконов [11], как с усилением, так и с подавлением ЯТ корреляций магнитным полем, и означает, что в реальных кристаллах всегда имеются механические напряжения внутренние или внешние, обусловленные условиями эксперимента, роль которых вблизи ФП возрастает из-за сильного смягчения соответствующей упругой константы.

В заключение отметим, что экспериментальные данные по тепловому расширению и магнитострикции  $TmVO_4$  допускают адекватную интерпретацию в рамках теории кооперативного эффекта Яна–Теллера, обобщенной на случай учета возбужденных состояний и наличия слабых механических напряжений. Сильное влияние механических напряжений на магнитоупругие свойства ян-теллеровских эластиков, характеризующихся вблизи ФП аномально высокой упругой восприимчивостью к различным внешним воздействиям, не является неожиданным. Более детального исследования заслуживает влияние контролируемых в процессе эксперимента механических напряжений на кристаллы с различными типами ян-теллеровских ионов и различными типами искажения при ФП.

## Список литературы

- [1] E. Pytte. Phys. Rev. **9**, 3, 932 (1974).
- [2] W.G. Wyckoff. Crystal Structure. Interscience, N.Y. (1965). V. 3.
- [3] Б.Г. Вехтер, М.Д. Каплан. ФТГ **16**, 6, 1630 (1974).
- [4] Б.Г. Вехтер, М.Д. Каплан. ЖЭТФ **87**, 5(11), 1774 (1984).
- [5] З.А. Казей, В.И. Соколов. ЖЭТФ **91**, 5(11), 1799 (1986).
- [6] Б.Г. Вехтер, М.Д. Каплан. ФНТ **14**, 4, 395 (1988).
- [7] З.А. Казей, М.В. Леванидов, В.И. Соколов. ПТЭ, **1**, 196 (1982).
- [8] A.H. Cooke, S.J. Swithenby, M.R. Wells. Solid State Commun. **10**, 265 (1972).
- [9] A. Segrmuller, R.L. Melcher, H. Kinder. Solid State Commun. **15**, 1, 101 (1974).
- [10] R.L. Melcher, E. Pytte, B.A. Scott. Phys. Rev. Lett. **31**, 307 (1973).
- [11] В.Г. Вехтер, З.А. Казей, М.Д. Каплан, В.И. Соколов. Письма в ЖЭТФ **43**, 6, 287 (1986).