

## АНИЗОТРОПИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПАРАМАГНЕТИКА ВАН-ФЛЕКА $TmPO_4$

В.А.Иоффе<sup>1)</sup>, С.И.Андроненко<sup>1)</sup>, И.А.Бондарь<sup>1)</sup>,  
Л.П.Мезенцева<sup>1)</sup>, А.Н.Бажан<sup>2)</sup>, Ч.Базан<sup>3)</sup>

Исследованы магнитные свойства монокристаллов  $TmPO_4$  в интервале магнитных полей  $H$  от 0 до 60 кЭ при температурах от 1,7 до 40 К и в интервале  $H$  от 0 до 130 кЭ при  $T = 4,2$  К. Впервые обнаружена анизотропия магнитного момента  $M(H)$  в базисной плоскости кристалла при ориентациях  $\mathbf{H} \parallel [100]$  и  $\mathbf{H} \parallel [110]$ , возникающая при  $H > 10$  кЭ и сохраняющаяся в сильных магнитных полях.

Монокристаллы ортофосфата тулия  $TmPO_4$  тетрагональной симметрии — парамагнетика Ван-Флека с ян-теллеровским взаимодействием в настоящее время довольно интенсивно исследуются [1 — 10]. В работе [1] при исследовании спектров ЭПР  $Gd$  в  $TmPO_4$  наблюдаемую зависимость ширины линии ЭПР от температуры авторы объясняют динамическими ян-теллеровскими искажениями, образующими локальное орторомбическое окружение редкоземельного иона. В работе [2] авторы исследовали зависимости упругих констант  $c_{66}$  и  $c_{44}$  от температуры. Обнаруженное резкое уменьшение константы  $c_{66}$  около температуры  $T \approx 20$  К авторами [2] объясняется ян-теллеровской связью иона  $Tm^{3+}$  с  $V_{2g}$  модой колебаний решетки. Так как упругая константа  $c_{66}$  не достигает нуля при температурах  $T \approx 20$  К, авторы [2] указывают, что кооперативного ян-теллеровского фазового перехода в  $TmPO_4$  не происходит. В работе [3] при исследовании ЭПР  $Gd^{3+}$  в  $TmPO_4$  в магнитных полях до 20 кЭ, обнаружена анизотропия магнитных свойств  $TmPO_4$ , возникающая в сильных магнитных полях.

Представляет интерес изучение зависимостей магнитного момента от приложенного магнитного поля  $TmPO_4$  при различных ориентациях  $H$  относительно осей монокристалла. Эксперименты проводились на магнитометре с вибрирующим образцом [4], созданном в ИФП АН СССР, в интервале магнитных полей от 0 до 60 кЭ при температурах  $1,7 \text{ К} < T < 40 \text{ К}$  и на магнитометре, созданном в международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав, ПНР), в интервале магнитных полей от 0 до 150 кЭ при  $T = 4,2$  К. Монокристаллы  $TmPO_4$  содержали примеси  $Gd^{3+}$  и  $Er^{3+}$  присутствовавших в исходной окиси тулия, спектры ЭПР которых изучались на этих монокристаллах [3].

<sup>1)</sup> Институт химии силикатов АН СССР, Ленинград.

<sup>2)</sup> Институт физических проблем АН СССР, Москва

<sup>3)</sup> Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур г. Вроцлав, ПНР.

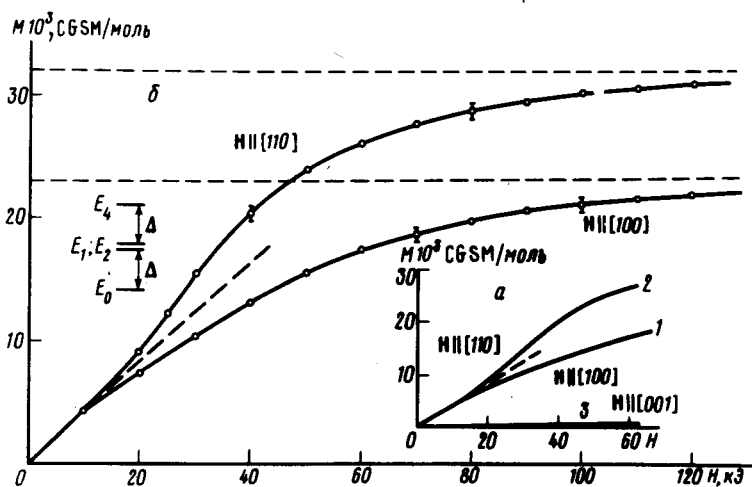


Рис.1.

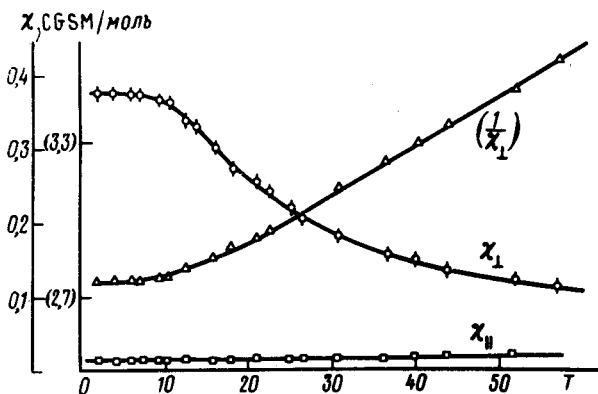


Рис.2

На рис.1, а представлены зависимости магнитного момента от приложенного магнитного поля  $H$  при ориентации  $\mathbf{H}$  вдоль бинарной оси  $[100]$  – кривая 1, бинарной оси  $[110]$  – кривая 2 и тетрагональной оси  $[001]$  – кривая 3. Из рисунка видно, что зависимости  $M(H)$  при  $\mathbf{H} \parallel [100]$  и  $\mathbf{H} \parallel [110]$  в магнитных полях до 15 кЭ совпадают и описываются выражением  $M(H) = \chi H$ , где  $\chi = 0,38 \pm 0,02$  CGSM/моль. При магнитных полях  $H > 15$  кЭ возникает существенное различие зависимостей  $M(H)$  при  $\mathbf{H} \parallel [100]$  и  $\mathbf{H} \parallel [110]$  и эти зависимости становятся нелинейными. При ориентации  $\mathbf{H} \parallel [001]$  наблюдается линейная зависимость  $M(H) = \chi^* H$ , где  $\chi^* = (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$  CGSM/моль. В результате обработки кривых намагничивания  $M(H, T)$  при различных температурах мы построили зависимость магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  от температуры в слабых магнитных полях  $H < 15$  кЭ, рис.2, а, при  $\mathbf{H} \parallel [100]$  – кривая 2 и зависимость от температуры разности  $\Delta M(H_0)$  магнитных моментов  $M(H)$  при  $H_0 = 50$  кЭ при  $\mathbf{H} \parallel [100]$  и  $\mathbf{H} \parallel [110]$ , рис.2, б. Из рис.2, б видно, что характер зависимости магнитной восприимчивости от температуры и разности магнитных моментов  $\Delta M(H_0)$  от температуры при  $\mathbf{H} \parallel [100]$  и  $\mathbf{H} \parallel [110]$  изменяются в области температур  $T$  порядка  $18^\circ$ . На рис.1, б представлена зависимость магнит-

ного момента от приложенного магнитного поля  $TmPO_4$  при  $H \parallel [100]$  и  $H \parallel [110]$  при  $T = 4,2$  К в магнитных полях до 130 кЭ. Видно, что нелинейные зависимости  $M(H)$  при  $H \parallel [100]$  и  $H \parallel [110]$  сохраняются и анизотропия  $M(H)$  остается. Возможно, что при увеличении магнитного поля нелинейные зависимости магнитных моментов  $M(H)$  при  $H \parallel [110]$  и  $H \parallel [100]$  стремятся к насыщению  $M(H) = M_0$ , где  $M_0 = (3,2 \pm 0,3) \times 10^4$  CGSM/моль и  $M(H) = M_0^*$ , где  $M_0^* = (2,3 \pm 0,3) \cdot 10^4 = \sqrt{2}/2 M_0$ .

### Обсуждение результатов

В слабых магнитных полях  $H < 15$  кЭ монокристаллы  $TmPO_4$  проявляют обычные свойства парамагнетика Ван-Флека. Зависимость магнитного момента от приложенного магнитного поля линейна, а магнитная восприимчивость при  $T < 6$  К не зависит от температуры. При повышении температуры зависимость магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  становится обратно пропорциональной температуре. На рис.2 кривая 2 представляет зависимость  $1/\chi$  от  $T$ . Видно, что линейная зависимость  $1/\chi(T)$  наблюдается при  $T > 18$  К. По закону Кюри – Вейса магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  с учетом изменения магнитной восприимчивости Ван-Флека с температурой, происходящей из-за изменения заселенности основного и ближайших к нему энергетических уровней можно определить для  $TmPO_4$  значение эффективного  $g_{\perp}$ -фактора магнитного момента в плоскости (001) при эффективном спине  $S = 1/2$ ,  $g_{\perp} = 10 \pm 1$ . На рис.1 представлены энергетические уровни  $TmPO_4$ , полученные по данным из оптических измерений [5]. Согласно работе [5], основное состояние  $TmPO_4$  – синглет, ближайший дублет отдален от него энергетическим интервалом  $\Delta \approx 30$  см<sup>-1</sup> и затем также на расстоянии  $\Delta \approx 30$  см<sup>-1</sup> находится синглет. Следующие энергетические уровни отделены энергетическим интервалом  $\Delta E \approx 140$  см<sup>-1</sup>. При рассмотрении магнитных свойств  $TmPO_4$  можно учитывать четыре электронных невырожденных уровня, показанных на рис.1.

Анизотропия магнитной восприимчивости при  $H \parallel [100]$  и  $H \parallel [001]$  объясняется тем, что по симметрии [6] в восприимчивость  $\chi^*$  (при  $H \parallel [001]$ ) должны давать вклад электроны более высоких, чем указанные на рис.1, уровней. Значение  $g_{\parallel}$ -фактора магнитного момента при  $H \parallel [001]$  можно положить  $g_{\parallel} \approx 0$  по сравнению со значением  $g_{\perp}$ -фактора при  $H \perp [001]$ . Электроны на энергетических уровнях  $\Delta$  и  $2\Delta$  дают вклад в магнитную восприимчивость  $\chi$  (при  $H \perp [001]$ ). Полученное нами значение магнитной восприимчивости  $\chi$  соответствует энергетическому интервалу между основным и следующим уровнями  $\Delta = 28 \pm 4$  см<sup>-1</sup>.

Необычным магнитным свойством монокристаллов  $TmPO_4$  является возникновение нелинейной зависимости  $M(H)$  и возникновение анизотропии  $M(H)$  при ориентациях  $H \parallel [100]$  и  $H \parallel [110]$  в магнитных полях  $H > 15$  кЭ. Этот результат возможно объясняется на основании теории молекулярного поля и эффекта Яна – Теллера, развитой в обзоре [7] и работах [8, 9] для таких же четырех нижних невырожденных электронных состояний и ян-теллеровских искажений тетрагональной решетки  $TbVO_4$ .

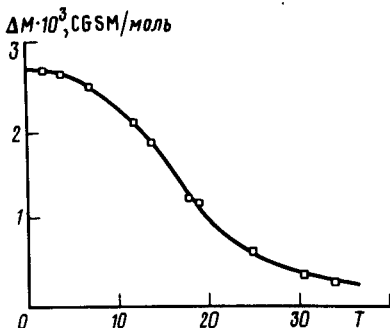


Рис.3.

Как видно из рис.1, кривая 1, при магнитном поле, ориентированном вдоль оси [110], нелинейность зависимости  $M(H)$  в магнитных полях  $H \approx 30 - 40$  кЭ изменяет свой характер. Магнитная восприимчивость  $\chi(H)$  в этих полях имеет максимальное значение. Такую зависимость магнитного момента и магнитной восприимчивости можно объяснить, если предположить, как это сделано в работах [6, 10], что ближайший к нижнему синглету дублет, отделенный энергетическим интервалом  $\Delta = 30 \text{ см}^{-1}$ , расщепляется под действием магнитного поля. В магнитном поле  $H_c \approx 30$  кЭ происходит пересечение уровней. Энергетический интервал  $\Delta \approx 30 \text{ см}^{-1}$  при эффективном спине  $1/2$  и  $g_{\perp}$ -факторе  $g_{\perp} = 10 \pm 1$  соответствует магнитному полку пересечения  $2g_{\perp} \mu_B SH_c = \Delta$ ,  $H_c \approx 30$  кЭ. Сильное расщепление дублета магнитным полем возможно связано с тем, что под действием магнитного поля  $\mathbf{H} \parallel [110]$  происходит магнитоstrictionное или Ян-Теллеровское искажение решетки  $\text{TmPO}_4$  и изменение кристаллического поля, действующего на магнитный ион  $\text{Tm}^{3+}$  расщепляя дублет. Это предположение можно согласовать с выводами работ [6 - 10]. При магнитном поле  $\mathbf{H} \parallel [100]$  нелинейная зависимость  $M(H)$  кривая 2 рис.1 в сильных магнитных полях не имеет особенностей и магнитная восприимчивость плавно уменьшается по величине. Нелинейные зависимости  $M(H)$  при  $\mathbf{H} \parallel [110]$  и  $\mathbf{H} \parallel [100]$  в сильных магнитных полях можно объяснить на основании предположений о движении под действием кристаллического и магнитного полей энергетических уровней рис.1 иона  $\text{Tm}^{3+}$ , рассчитывая смещение этих уровней под действием магнитного поля  $\mathbf{H} \parallel [110]$  и  $\mathbf{H} \parallel [100]$ , [11].

Подробный анализ полученных экспериментальных данных будет опубликован в дальнейшем.

Авторы благодарят П.Л.Капицу и А.С.Боровика-Романова за интерес к работе, Н.М.Крейнес за обсуждение результатов.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
3 ноября 1981 г.

### Литература

- [1] Mehran F., Plaskett T.S., Stevens K.W.H. Phys. Rev., B16, 1, 1977.  
[2] Harley R.T., Manning D.I. J. Phys. C. Sol. St. Phys., 11L, 633, 1977.

- [3] *Абдулсабиров Р.Ю., Андроненко С.И., Мезенцева Л.П., Бондарь И.А., Иоффе В.А.* ФТТ, 1981, **23**, 582.
- [4] *Бажан А.Н., Боровик-Романов А.С., Крейнес Н.М.* ПТЭ, 1973, №1, 44.
- [5] *Knoll K.D.* Phys. Stat Sol. (b), 1971, **45**, 533.
- [6] *Теплов М.А.* Диссертация докторская. Казань, 1980 г.
- [7] *Gehring G.A., Gehring K.A.* Reports on Progress in Physics, **38**, №1, 1975.
- [8] *Pytte E., Stevens K.W.H.* Phys. Rev. Lett., 1971, **27**, 862.
- [9] *Elliot R.J., Harley R.T., Hayes W., Smith S.K.R.* Proc. R. Soc., 1972, **A328**, 217.
- [10] *Diederix K.M., Groen J.P., Klaassen T.O., Poulis N.J., Carlen R.L.* Physica, 1979, **97B**, 113.
- [11] *Уайт Р.М.* Квантовая теория магнетизма. М.: Мир, 1979.
-