

*Письма в ЖЭТФ, том 9, стр. 671 – 675*

*20 июня 1969г.*

**МАГНЕТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ  
В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФЕРРИТАХ-ГРАНАТАХ**

*К.Н.Белов, Е.В.Талалаева, Л.А.Черникова, В.И.Ивановский  
Т.В.Кудрявцева*

Нами был измерен магнетокалорический эффект  $\Delta T(H)$  в редкоземельных ферритах-гранатах Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Tm, а также в феррите-гранате иттрия.

$\Delta T$ -эффект является энергетической характеристикой и поэтому изучение его может дать дополнительные сведения о магнитной струк-

туре и обменных взаимодействиях в редкоземельных ферритах-гранатах. Следует отметить, что измерения  $\Delta T$ -эффекта в ферритах представляют известные трудности. Методика и условия измерений нами указаны в работе [1].

На рисунке приведены кривые  $\Delta T(T)$  для изучаемых ферритов в интервале от 78° К до точки Кюри в магнитном поле 16 кэ. Видно что для редкоземельных ферритов эти кривые носят весьма сложный характер по сравнению с кривой для феррита иттрия. Усложнение в кривые вносят редкоземельные ионы.

1. В области ниже точки магнитной компенсации  $\Delta T$ -эффект имеет положительный знак. Поскольку в наших опытах использовались поля значительно ниже критических полей, при которых нарушается коллинеарное расположение магнитных моментов редкоземельной и железной подрешеток [2], то величина  $\Delta T$ -эффекта, в основном, определяется парапроцессом редкоземельных ионов.

Так как ниже  $\theta_k$  внешнее поле  $H$  и эффективное обменное поле  $H_{эфф}$ , действующее со стороны железных ионов на редкоземельные ионы, совпадают по направлению, то в этой области температур имеем обычный парапроцесс "ферромагнитного" типа и соответствующий ему положительный  $\Delta T$ -эффект.

Для феррита-граната гадолиния, как следует из рисунка в области 90° К наблюдается максимум положительного  $\Delta T$ -эффекта. Этот максимум приходится на так называемую "низкотемпературную точку"  $\theta_{нп}$ , в которой происходит резкое изменение магнитного порядка в редкоземельной подрешетке [3]. В работе [4] по методу молекулярного поля был рассчитан  $\Delta T$ -эффект, соответствующий этой точке:

$$\Delta T = \frac{\nu \mu_B g_s S H_{эфф}}{C_{VM} \mu_{co}} \chi H,$$

где  $C_{VM}$  — теплоемкость,  $\mu_{co}$  — магнитный момент редкоземельной подрешетки,  $S$  и  $g_s$  — спин и  $g$  — фактор редкоземельного иона,  $\mu_B$  — магнетон Бора и  $\chi$  — восприимчивость парапроцесса. Оценка по этой формуле дает для  $H = 10^4$  э величину  $\Delta T \approx 7 \cdot 10^{-2}$  град, что хорошо согласуется с нашими экспериментальными данными.

В ферритах-гранатах Tb, Dy, Ho, Er, Yb, и Tm "низкотемпературные точки" лежат при более низких температурах [5]. Анализ  $\Delta T$ -эффекта для этих ферритов, особенно в области очень низких температур, еще

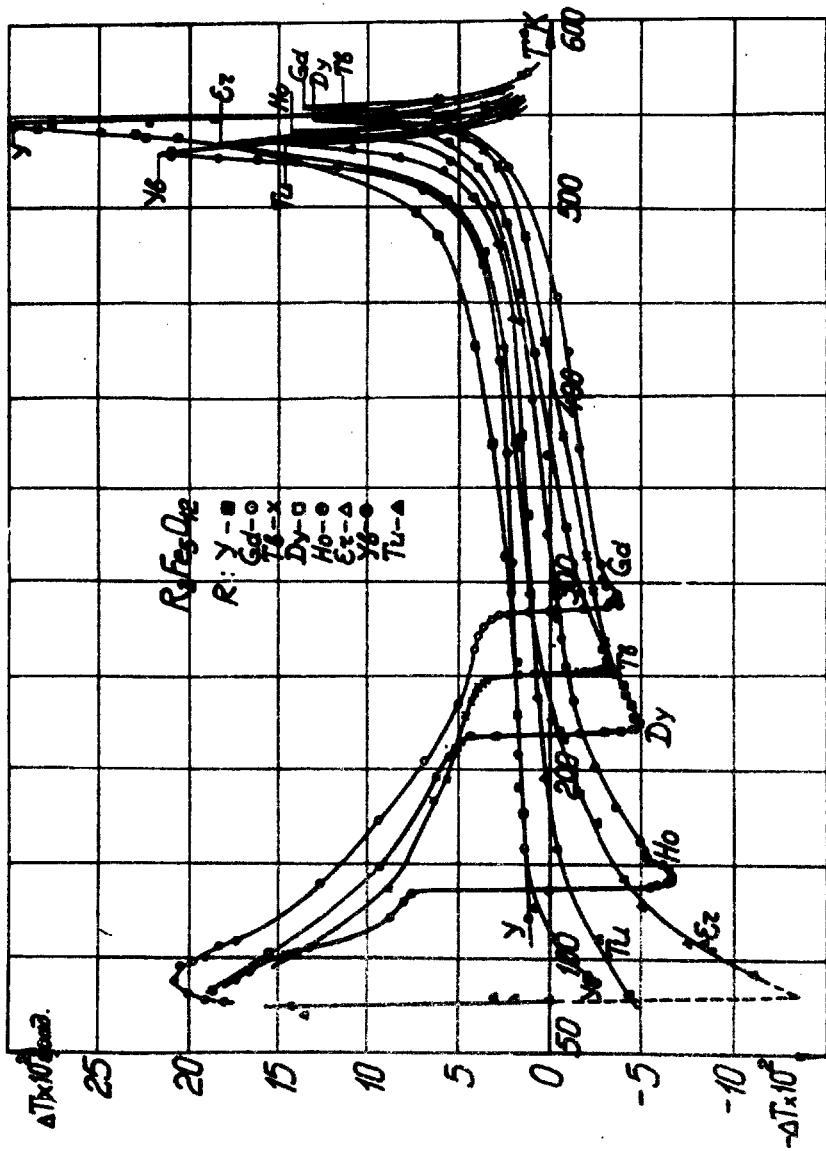


Рис.1. Температурная зависимость магнетокалорического эффекта, измеренного во внешнем магнитном поле 16 кэ для ферритов-гранатов Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Tm и Y (в районе температуры Кюри экспериментальные точки на некоторых кривых не указаны)

более осложняется, так как в намагничивании помимо спина редкоземельного иона участвует орбитальный момент, на который существенное влияние оказывают электростатические силы решетки.

2. При температуре выше температуры компенсации  $\theta_k$  знак  $\Delta T$ -эффекта для редкоземельных гранатов становится отрицательным — в области  $\theta_k$  наблюдается скачок магнетокалорического эффекта. Существование отрицательного эффекта мы объясняем тем, что в этой области температур происходит парапроцесс "антиферромагнитного" типа, так как  $N$  и  $N_{\text{эфф}}$  при  $T > \theta_k$  направлены в противоположные стороны. Этот механизм намагничивания приводит к возрастанию энтропии системы магнитных моментов редкоземельной подрешетки и, следовательно, к уменьшению энтропии кристаллической решетки, т.е. к понижению ее температуры.

Из рисунка видно, что величина максимального отрицательного  $\Delta T$ -эффекта тем больше, чем ниже расположена точка компенсации  $\theta_k$ . По-видимому, в ферритах-гранатах  $Yb$  и  $Tu$ , у которых точки  $\theta_k$  лежат в области гелиевых температур, отрицательный  $\Delta T$ -эффект будет намного больше, чем в ферритах  $Ho$  и  $Er$ .

Возрастание скачка  $\Delta T$ -эффекта у гранатов с более низкими точками компенсации можно объяснить следующим образом. Как известно, величина  $\Delta T$ -эффекта определяется величиной  $d\sigma_s/dT$  или величиной изменения магнитной части энтропии  $\Delta S_m$ . На примере феррита-граната  $Gd$  мы видели, что величина  $d\sigma_s/dT$  достигает максимума в районе низкотемпературной точки. Поэтому, чем ближе расположена  $\theta_k$  к низкотемпературной точке  $\theta_H$ , тем больше будет скачок  $\Delta T$ -эффекта. В ферритах-гранатах  $Yb$  и  $Tu$  имеется наиболее благоприятная ситуация для близкого расположения точек  $\theta_H$  и  $\theta_k$ .

3. В районе температуры Кюри у всех исследованных гранатов наблюдается максимум магнетокалорического эффекта положительного знака, величина которого в редкоземельных гранатах меньше, чем в гранате  $Y$ , что находится в соответствии с измерениями магнитной восприимчивости [6] и выводами работы [7].

Московский  
государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
20 мая 1969 г.

## Литература

- [1] К.П.Белов, Е.В.Талалаева, Л.А.Черникова, В.И.Ивановский. Письма в ЖЭТФ, 7, 423, 1968.
  - [2] A.E.Clark, E.Callen. J .Appl. Phys. , 39, 5972, 1968.
  - [3] К.П.Белов. ЖЭТФ, 41, 692, 1961.
  - [4] К.П.Белов, С.А.Никитин. Phys. Stat. Sol., 12, № 1, 1965.
  - [5] В.И.Соколов. Кандидатская диссертация, МГУ, 1966.
  - [6] К.П.Белов, С.А.Никитин, Е.В.Талалаева , Л.А.Черникова, Г.А.Ярхо. ЖЭТФ, 55, 53, 1968.
  - [7] Е.В.Талалаева, Л.А.Черникова, В.И.Ивановский. Вестник МГУ, физика, астрономия № 5, 1969, в печати.
-