

Е. В. ТАЛАЛАЕВА, Л. А. ЧЕРНИКОВА, В. И. ИВАНОВСКИЙ

МАГНЕТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В РАЙОНЕ «НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТОЧКИ» В ФЕРРИТЕ—ГРАНАТЕ ГАДОЛИНИЯ

Экспериментальные исследования показали, что в области азотных температур в феррите—гранате Gd имеется большой парапроцесс. Наличие большого парапроцесса подтверждается обнаруженной Потене «ненасыщаемостью» намагниченности граната Gd в области низких температур в полях вплоть до 30 000 O_e [2]. Наличие большого парапроцесса подтверждается также многочисленными исследованиями Белова с сотрудниками по изучению магнитострикции [3] и по исследованию влияния всестороннего давления на намагниченность граната Gd [4]. Этими же авторами в области 90—100°K был обнаружен максимум восприимчивости, минимум коэрцитивной силы, максимум внутреннего трения и минимум ширины линии ферромагнитного резонансного поглощения.

Наличие таких аномалий, характерных для поведения обычных ферромагнетиков в области температуры Кюри, позволило Белову [5] высказать предположение о существовании в феррите—гранате Gd «низкотемпературной точки» θ_H , в которой происходит резкое изменение дальнего магнитного порядка в редкоземельной подрешетке, созданного действием обменного поля железных подрешеток. В работе [1] теоретически обоснованы низкотемпературные аномалии на основе теории молекулярного поля, исходя из предположения о том, что обменное взаимодействие редкоземельных ионов и ионов железа определяется не полными магнитными моментами ионов, а их спиновыми моментами. В работе [6] на основании такого рассмотрения для редкоземельных ферритов—гранатов были предсказаны максимумы теплоемкости и магнетокалорического эффекта в районе низкотемпературной точки.

Как известно, тепловые свойства магнетиков являются весьма чувствительными к изменению дальнего магнитного порядка и поэтому представляет интерес экспериментальное обнаружение аномалий теплоемкости и магнетокалорического эффекта в области «низкотемпературной точки».

Нами было проведено исследование температурной зависимости магнетокалорического эффекта $\Delta T(H)$ в широком интервале температур (от 78 до 600°K) для поликристаллических ферритов—гранатов Y и Gd, а также для феррита со структурой шпинели состава $Li_2O \cdot 2,5 Fe_2O_3 \cdot 2,5 Gd_2O_3$. Измерения $\Delta T(H)$ проводились на шариках $d \sim 5$ мм с помощью медьконстантановой термпары и потенциометрической установки с усилителем, как описано в работе [7], в вакууме порядка 10^{-3} мм рт. ст.¹

На рисунке приведены результаты измерений $\Delta T(H)$ в поле 16 KO_e при температуре от 78 до 600°K. Как видно из рисунка, магнетокалорический эффект для граната Y во всей исследованной области температур положительный и в районе температуры Кюри имеет резко выраженный максимум, характерный для обычных ферромагнетиков. При понижении температуры магнетокалорический эффект монотонно уменьшается, что говорит о том, что парапроцесс в $a-d$ железной подрешетке при понижении температуры также уменьшается.

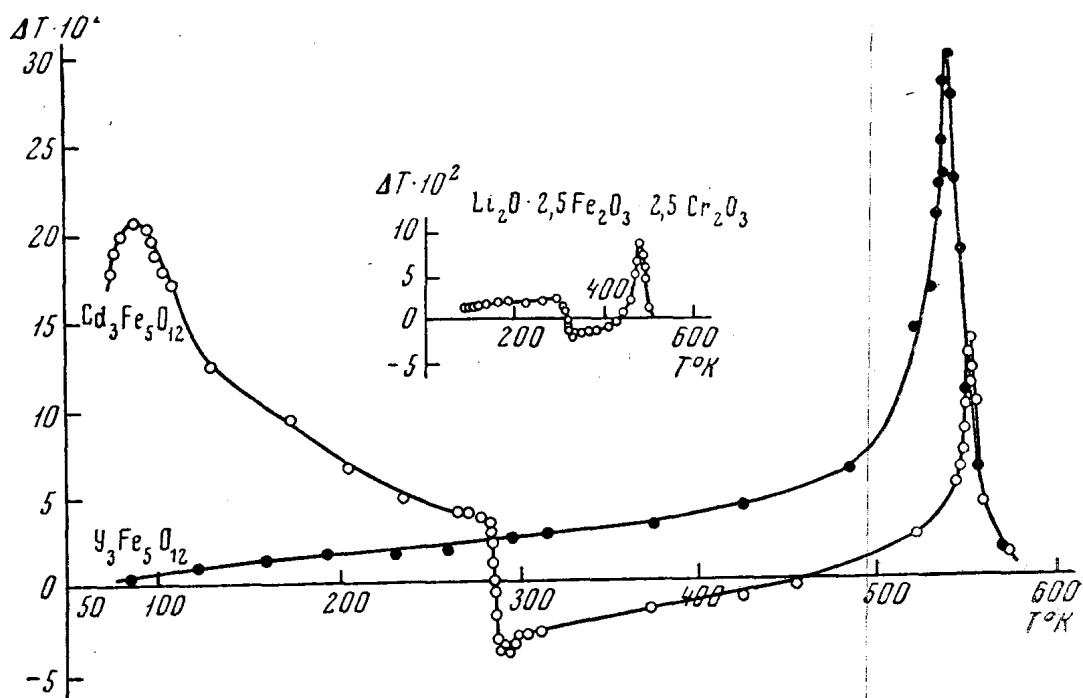
Кривая $\Delta T(H)$ для граната Gd более сложная по сравнению с кривой $\Delta T(H)$ для граната Y. Это усложнение вносится ионами Gd^{3+} . Рассмотрим влияние ионов Gd^{3+} на $\Delta T(H)$ -эффект, начиная с низких температур.

Магнетокалорический эффект для граната Gd в области температур $T < \theta_K$ (ниже точки компенсации) имеет положительный знак. В этой области температур магнитный момент гадолиниевой подрешетки больше магнитного момента железной подрешетки и вектор результирующей намагниченности граната направлен вдоль магнитного момента гадолиниевой подрешетки, т. е. вдоль эффективного обменного поля, действующего со стороны железных подрешеток на ионы Gd^{3+} . Поэтому внешнее поле, поворачивающее магнитные моменты ионов Gd^{3+} , разориентированные тепловым движением по полю, поворачивает их в направлении эффективного обменного поля, что сопровождается выделением тепла. Следовательно, в этой области температур мы имеем дело с обычным парапроцессом ионов Gd^{3+} — с парапроцессом ферромагнитного типа. В районе 90°K — в «низкотемпературной точке» для граната Gd нами был обнаружен максимум магнетокалорического эффекта, предсказанный теоретически Беловым и Никитиным [1, 6]; наши измерения подтверждают наличие в этой области температур своеобразной точки Кюри редкоземельной подрешетки Gd. Измерения, проведенные

¹ Дальнейшее улучшение вакуума (до 10^{-5} мм рт. ст.) не вызывало изменений в величине $\Delta T(H)$.

нами на феррите со структурой шпинели $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2,5 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2,5 \text{Cr}_2\text{O}_3$, тоже имеющем точку компенсации в области температур от 78°K до θ_k , не показали возрастания $\Delta T(H)$, что говорит о том, что в области температур от 78°K до θ_k в этом феррите «низкотемпературной» точки нет (см. рис.).

Из рисунка видно, что в районе точки компенсации магнетокалорический эффект в гранате Gd резко меняет знак и становится отрицательным. В работе [7] нами уже обсуждался вопрос о наличии в области температур $T > \theta_k$ в гадолиниевой подрешетке



Магнетокалорический эффект для гранатов Y и Gd и для феррита со структурой шпинели $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2,5 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2,5 \text{Cr}_2\text{O}_3$ в интервале от 78 до 600°K в поле 16 кэВ

парапроцесса антиферромагнитного типа, т. е. поворота магнитных моментов ионов Gd^{3+} внешним полем в направлении, противоположное обменному полю, что должно происходить с поглощением тепла, т. е. $\Delta T(H)$ -эффект имеет отрицательный знак¹. При температуре 460°K наблюдается своеобразная «температура компенсации» магнетокалорического эффекта, при которой вклады парапроцессов ферромагнитного и антиферромагнитного типов одинаковы.

В области температуры Кюри имеется положительный максимум магнетокалорического эффекта, величина которого определяется следующими процессами: во-первых, возникновением парапроцесса ферромагнитного типа в результирующей $a-d$ железной подрешетке; этот процесс дает положительный ΔT -эффект; во-вторых — парапроцессом антиферромагнитного типа в гадолиниевой подрешетке. Этот парапроцесс вблизи θ_f возрастает, так как эффективное обменное поле в этой области температур вследствие резкого уменьшения I_s сильно уменьшается. Этот парапроцесс дает ΔT -эффект отрицательного знака. Поэтому магнетокалорический эффект в гранате гадолиния в районе температуры Кюри представляет собой некоторый суммарный эффект. В силу того, что парапроцесс антиферромагнитного типа в гадолиниевой подрешетке вносит отрицательный вклад в ΔT , максимум $\Delta T(H)$ при $T = \theta_f$ в гранате Gd должен быть меньше, чем в гранате Y, что действительно имеет место (см. рис.).

В заключение авторы благодарят К. П. Белова, С. А. Никитина за постоянный интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

Авторы благодарят также Г. Е. Пустовалова и Г. И. Куприянова, оказавших большую помощь в осуществлении экспериментальной части работы.

¹ В этой области температур магнитный момент гадолиниевой подрешетки меньше, чем магнитный момент $a-d$ железной подрешетки и результирующий магнитный момент граната направлен против магнитного момента подрешетки c .

ЛИТЕРАТУРА

1. Belov K. P., Nikitin S. A. Phys. Status Solid., 12, n 1, 1965.
2. Pauthenet R. Ann. de Phys., 3, 428, 1958.
3. Belov K. P., Pedko A. V. J. Appl. Phys., 31, Suppl No. 5, 55, 1960; Белов К. П., Педько А. В. ЖЭТФ, 39, 961, 1960; Белов К. Г., Соколов В. И. ЖЭТФ, 48, 979, 1965.
4. Педько А. В. Реферат канд. диссертации. МГУ, 1962, Педько А. В. ЖЭТФ, 41, 700, 1961.
5. Белов К. П. ЖЭТФ, 41, 692, 1961; Белов К. П. «Изв. АН СССР», сер. физич., 25, 1320, 1961.
6. Белов К. П., Белянчикова М. А., Левитин Р. З., Никитин С. А. Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики. М., «Наука», 1965.
7. Белов К. П., Талалаева Е. В., Черникова Л. А., Ивановский В. И. Письма в ЖЭТФ, 7, вып. 11, 423, 1968.

Поступила в редакцию
16.4 1969 г.

Кафедра
общей физики для биологов

УДК—62—50

Г. А. БЕНДРИКОВ, Б. Б. БУХОВЦЕВ

МЕТОД ТРАЕКТОРИЙ КОРНЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ С КВАДРАТНЫМ ПАРАМЕТРОМ В ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ

Исследованию динамических свойств активных линейных систем в зависимости от свободных параметров, линейно входящих в коэффициенты характеристического уравнения, с помощью метода траекторий корней посвящен ряд работ [1, 2, 3]. В настоящей работе рассматриваются корневые годографы характеристических уравнений, при условии, что свободные параметры входят в коэффициенты уравнения как линейно, так и квадратично.

При исследовании динамических свойств систем, находящихся в потоке воздуха, таким свободным параметром может быть скорость потока. В коэффициенты характеристического уравнения двухканальных неидентичных систем автоматического регулирования может входить в качестве свободного параметра коэффициент усиления системы k . В этом случае в зависимости от вида обратной связи возможно изменение знака свободного параметра.

Рассмотрим характеристическое уравнение

$$\Phi_n(\rho) + \rho\Psi_m(\rho) + \rho^2\Theta_l(\rho) = 0, \quad (1)$$

где в качестве параметра траекторий выбран свободный параметр ρ , изменяющийся в пределах $-\infty < \rho \leq 0$ или $0 \leq \rho < +\infty$.

$$\Phi_n = a_n\rho^n + a_{n-1}\rho^{n-1} + \dots + a_0, \quad \Psi_m = b_m\rho^m + b_{m-1}\rho^{m-1} + \dots + b_0,$$

$$\Theta_l = c_l\rho^l + c_{l-1}\rho^{l-1} + \dots + c_0$$

— полиномы целых положительных степеней n, m, l соответственно с заданными постоянными коэффициентами a_ν, b_μ, c_λ , являющимися параметрами семейств траекторий корней.

Ввиду наличия в уравнении (1) членов с ρ^2 возможность применения геометрического метода траекторий корней в том виде, как указано в работах [1, 2, 3], ограничена.

Однако ряд свойств траекторий корней уравнений с линейным параметром сохраняется и в рассматриваемом случае.

Для получения уравнений траекторий корней и формул параметра траекторий воспользуемся тождествами:

$$\begin{aligned} \Phi_n(\delta + j\omega) &= \Phi_r(\delta, \omega^2) + j\omega\Phi_j(\delta, \omega^2), \\ \Psi_m(\delta + j\omega) &= \Psi_r(\delta, \omega^2) + j\omega\Psi_j(\delta, \omega^2), \end{aligned} \quad (2)$$