

# ОБМЕННЫЙ РЕЗОНАНС И ОПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФЕРРИТАХ-ГРАНАТАХ

Г.С.Кринчик

При изучении эффекта Фарадея в ферритах-гранатах иттрия, эрбия и гольмия в инфракрасной области было обнаружено существование не зависящего от частоты вращения плоскости поляризации света, обусловленного магнитной восприимчивостью ферромагнетика [1]. Расчет недиагональной компоненты тензора  $\mu$  из уравнения Ландау – Лифшица для двухподрешеточного ферромагнетика приводит к следующему выражению для эффекта Фарадея:

$$a_{\Phi} = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon}}{c} (\gamma_1 l_1 - \gamma_2 l_2) \quad (1)$$

или

$$a_{\Phi} = a_{\Phi}^{\text{рез}} + a_{\Phi}^{\text{обм}} = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon}}{c} \gamma_{\text{эфф}} \left[ l - \frac{l_1 l_2 (\gamma_1 - \gamma_2)^2}{\gamma_1 \gamma_2} \right], \quad (2)$$

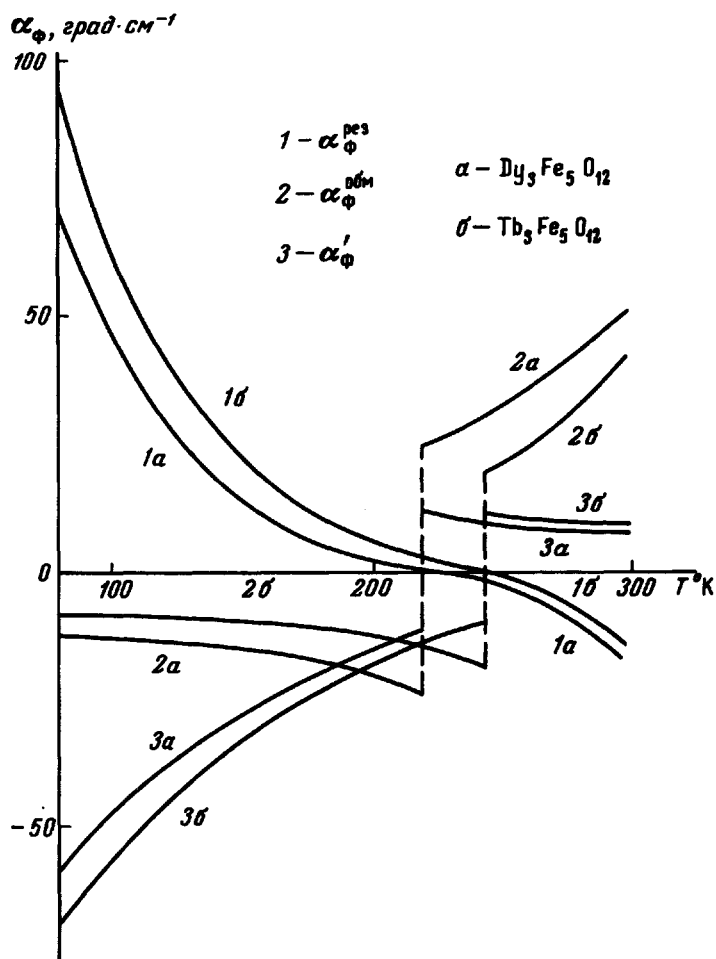
где  $l_1$  и  $l_2$  – намагниченности подрешеток,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – гиромангнитные отношения,

$$\gamma_{\text{эфф}} = \frac{l_1 - l_2}{l_1/\gamma_1 - l_2/\gamma_2}, \quad l = |l_1 - l_2|$$

и  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость. Первое слагаемое в (2) представляет вклад обычного ферромагнитного резонанса, а второе – обменного резонанса Каплана – Киттеля [2]. Для иттриевого, эрбиевого и гольмиевого гранатов было получено хорошее согласие  $a_{\Phi}^{\text{расч}}$ , рассчитанных по формуле (1) при использовании для редкоземельных ионов значений  $g_j$ , с  $a_{\Phi}^{\text{эксп}}$ . Однако, в работе [3] было показано, что для количественного согласования  $a_{\Phi}^{\text{расч}}$  с  $a_{\Phi}^{\text{эксп}}$  ферритов-гранатов тербия и диспрозия при  $T \cong 100^\circ\text{K}$  приходится предположить, что  $g$  – факторы ионов  $\text{Dy}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  уменьшаются до 0,8 + 0,9 в то время как  $g_j^{\text{Dy}} = 1,33$ , а  $g_j^{\text{Tb}} = 1,5$ . Затем Джонсон и Теббл [4] этим же методом нашли, что в интервале от 300 до 80°K  $g$  – фактор ионов  $\text{Dy}^{3+}$  в  $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  изменяется в пределах от 1,06 до 0,77, а Четкин и Шалыгин [5] определили, что  $g$  – фактор ионов  $\text{Tb}^{3+}$  в  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  изменяется от 1,15 до 1,0.

Таким образом, в указанном интервале температур отличие  $g$ -факторов ионов  $\text{Dy}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  рассчитанных по формуле (1) от  $g_j$ , достигает 50%. Это противоречит результатам определения  $g$ -факторов по магнит-

ной восприимчивости, согласно которым  $g$ -факторы редкоземельных ионов, входящих в состав самых различных кристаллов, отличаются при комнатной температуре от  $g_i$  меньше чем на 1% (см., например, [6]). Рассмотрим поэтому следующее предположение: в интервале



$T \geq 80^{\circ}\text{K}$   $g$ -факторы редкоземельных ионов, входящих в состав ферритов-гранатов, мало отличаются от  $g_i$ , а отличие  $\alpha_{\phi}^{\text{эксп}}$  от  $\alpha_{\phi}^{\text{расч}}$  объясняется действием дополнительного физического механизма, т.е. в отличие от (2):  $\alpha_{\phi} = \alpha_{\phi}^{\text{рез}} + \alpha_{\phi}^{\text{обм}} + \alpha_{\phi}'$ . На рисунке представлены кривые  $\alpha_{\phi}^{\text{рез}}$ ,  $\alpha_{\phi}^{\text{обм}}$ ,  $\alpha_{\phi}'$  для  $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , полученные из экспериментальных кривых  $\alpha_{\phi}$  [4, 5] при расчете вкладов  $\alpha_{\phi}^{\text{рез}}$  и  $\alpha_{\phi}^{\text{обм}}$  с использованием значений  $g_i$  для редкоземельных ионов. Из приведенного рисунка видно, что  $\alpha_{\phi}'$  имеет характерную температурную за-

зависимость и сопоставимо по величине с  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{рез}}$  и  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{обм}}$ . Дополнительным физическим механизмом, приводящим к наличию  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{рез}}$  может, по-видимому, служить одноионный обменный резонанс, обнаруженный Тинкэмом при изучении резонансных свойств ферритов-гранатов в далекой инфракрасной области [7]. В отличие от обменного резонанса Каплана – Киттеля одноионный обменный резонанс соответствует переориентации магнитных моментов отдельных редкоземельных ионов в обменном поле железной подрешетки. Можно привести следующие соображения в пользу указанного предположения: 1.  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{рез}}$  при  $\omega \gg \omega_{\text{рез}}$  также не должно зависеть от  $\omega$ , как и вклад в  $\alpha_{\text{Ф}}$  любого магнитного резонанса: ферромагнитного, антиферромагнитного, парамагнитного, ядерного и т.д.; 2.  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{рез}}$  соответствует интенсивности одноионного обменного резонанса, которая сравнима по порядку величины с интенсивностью обменного резонанса Каплана – Киттеля [7]; 3. Величина  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{рез}}$  резко возрастает при увеличении намагниченности редкоземельной подрешетки, вызванном понижением температуры (см. рисунок).

Отметим также следующее обстоятельство. При измерениях  $\alpha_{\text{Ф}}$  в  $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  ( $T = 300^\circ\text{K}$ ,  $\lambda = 4 \text{ мк}$ ) Тютневой [8] была обнаружена анизотропия эффекта Фарадея:  $\alpha_{\text{Ф}}^H \parallel [111] = 28 \text{ рад/см}$ ,  $\alpha_{\text{Ф}}^H \parallel [110] = 33 \text{ рад/см}$ ,  $\alpha_{\text{Ф}}^H \parallel [100] = 36 \text{ рад/см}$ . Абсолютные значения гиромагнитных эффектов Фарадея при измерении вдоль главных кристаллографических осей подлежат уточнению, поскольку при  $\lambda = 4 \text{ мк}$  еще имеется небольшой вклад гирозлектрического эффекта в  $\alpha_{\text{Ф}}$  [8], однако, существенно, что разность  $\alpha_{\text{Ф}}^H \parallel [100] - \alpha_{\text{Ф}}^H \parallel [111] = 8 \text{ рад/см}$ , т.е. по порядку величины соответствует  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{рез}}$ .

Тинкэм [7] предположил, что интенсивность одноионного обменного резонанса определяется различием поперечных  $\gamma$ -факторов соседних редкоземельных ионов благодаря неэквивалентности мест в решетке граната, причем эта неэквивалентность связана с ориентацией вектора намагниченности относительно кристаллографических осей.

Таким образом, одноионный обменный резонанс может иметь значительно большую анизотропию, чем обменный резонанс Каплана – Киттеля, интенсивность которого связана с различием продольных  $\gamma$ -факторов (см. (2)), определяющих собственные частоты прецессии и магнитную восприимчивость. Измерение анизотропии гиромагнитного эффекта Фарадея при низких температурах, где вклад  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{обм}}$  резко уменьшается (см. рисунок), а величину  $\alpha_{\text{Ф}}^{\text{рез}}$  можно определить из незави-

симых измерений частоты ферромагнитного резонанса, является поэтому методом прямой экспериментальной проверки существования обменного эффекта Фарадея второго типа  $\alpha_{\text{Ф}}^{\prime}$ .

Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
им. М.В.Ломоносова

Поступило в редакцию  
8 августа 1968 г.

### Литература

- [1] Г.С.Кринчик, М.В.Четкин. ЖЭТФ, 41, 673, 1961; J. Phys. Soc. Jap, Suppl. B1, 17, 358, 1962.
- [2] J. Kaplan, C. Kittel. J. Chem. Phys., 21, 760, 1953.
- [3] Г.С.Кринчик, Г.К.Тютнева. Изв. АН СССР, сер. физ. 28, 489, 1964.
- [4] B. Jonson, K. Tebble. Proc. Phys. Soc., 87, 935, 1966.
- [5] М.В.Четкин, А.Н.Шалыгин. ЖЭТФ, 52, 882, 1967.
- [6] S. Chikazumi. Physics of Magnetism, Wiley, 1965, стр. 448.
- [7] M. Tinkham. Phys. Rev., 124, 311, 1961; J. Appl. Phys., 33, 1248, 1962.
- [8] Г.К.Тютнева. Канд. диссертация. Физический факультет МГУ, 1964.