

УДК 537.61; 538.955

PACS: 78.20.Ls, 75.10.Lp, 71.23.An

Магнетизм и диэлектрическая восприимчивость ферритов-гранатов: теория и эксперимент

Е.С. Орел

*Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н.Бекетова,
61002, г. Харьков, ул. Революции, 12*

Рассмотрен электронный вклад в статическую диэлектрическую восприимчивость вносимый атомами редкоземельных элементов и соответствующими $4f$ -оболочками (χ_{4f}), гранатов $R_3Me_5O_{12}$ ($R=Y, Gd, Tb, Dy, Ho$; $Me=Fe, Ga$). Из всех приведенных характеристик R -элементов, заметно коррелирует с χ_{4f} лишь магнитный момент $4f$ -оболочки gJ . Анализ этой корреляции с помощью формулы для магнитного вклада в статическую диэлектрическую восприимчивость $\chi(0)$, полученной в работе [2] показал, что это соотношение может объяснить экспериментально обнаруженную квадратичную по магнитному моменту иона добавку к статической электронной поляризуемости оксидов железа [3,4] и редкоземельных элементов [5] и позволяет в трехпараметрическом приближении качественно воспроизвести экспериментальные значения магнитного вклада в статическую диэлектрическую восприимчивость ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$.

Ключевые слова: статическая диэлектрическая восприимчивость, редкоземельные элементы, магнитный момент $4f$ -оболочки.

Розглянуто електронний внесок в статичну діелектричну сприйнятливість, що вноситься атомами рідкоземельних елементів і відповідними $4f$ -оболонками (χ_{4f}), гранатів $R_3Me_5O_{12}$ ($R=Y, Gd, Tb, Dy, Ho$; $Me=Fe, Ga$). З усіх приведених характеристик R -елементів, помітно корелює з χ_{4f} лише магнітний момент $4f$ -оболонки gJ . Аналіз цієї кореляції за допомогою формули для магнітного вкладу в статичну діелектричну сприйнятливість $\chi(0)$, отриману в роботі [2] показав, що це співвідношення може пояснити експериментально виявлену квадратичну по магнітному моменту іона добавку до статичної електронної поляризуємості оксидів заліза [3,4] і рідкоземельних елементів [5] і дозволяє в трьохпараметричному наближенні якісно відтворити експериментальні значення магнітного вкладу в статичну діелектричну сприйнятливість феритів-гранатів $R_3Fe_5O_{12}$.

Ключові слова: статична діелектрична сприйнятливість, рідкоземельні елементи, магнітний момент $4f$ -оболонки.

The electronic contribution to a static dielectric susceptibility brought by atoms of rare-earth elements and corresponding $4f$ -shells (χ_{4f}), garnets $R_3Me_5O_{12}$ ($R=Y, Gd, Tb, Dy, Ho$; $Me=Fe, Ga$) is considered. From all resulted characteristics of R -elements, considerably correlates with χ_{4f} only magnetic moment $4f$ -shell gJ . The analysis of this correlation by means of the formula for the magnetic contribution to a static dielectric susceptibility $\chi(0)$, received in work [2] has shown that this parity gland can explain experimentally found out square-law on the magnetic moment of an ion an additive to static electronic polarizability oxides of iron [3,4] and rare-earth elements [5] and allows to reproduce qualitatively in three-parametrical approach experimental values of the magnetic contribution to a static dielectric susceptibility of ferrite-garnets $R_3Fe_5O_{12}$.

Keywords: static dielectric susceptibility, rare-earth elements, magnetic moment $4f$ -shell.

Введение

Проблема взаимосвязи электрических и магнитных свойств вещества относится к основным в материаловедении для современной микроэлектроники. Электронный вклад в статическую диэлектрическую восприимчивость системы $\chi(0)=2\sum D_j^2/E_j$ (D_j - модуль дипольного момента электронного перехода с индексом j , E_j -энергия перехода) представляет в этом контексте особый интерес.

Экспериментальные данные

Величина $\chi(0)$ заметно больше в случае соединений,

содержащих магнитные ионы [1]: как можно видеть из Таблицы 1, при переходе от YGG к YIG χ_{mol} возрастает на 55% за счет вклада от магнитоактивной $3d$ -оболочки Fe. Вклад от $4f$ -оболочек несколько меньше (величина χ_R для Gd в GdGG превышает χ_R для Y в YGG на 22%), однако его более удобно исследовать ввиду близости химических свойств редкоземельных элементов (РЗЭ). Результаты проведенного в настоящей работе оптическими методами экспериментального изучения $\chi(0)$ гранатов представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1 (где величина $3V_R/4\pi$ соответствует вкладу R -элемента в χ_{mol} , вычисленному

в рамках классического подхода), из всех приведенных характеристик R-элементов заметно коррелирует с χ_{4f} лишь магнитный момент $4f$ -оболочки gJ.

Магнитный вклад в статическую диэлектрическую восприимчивость ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$

Мы проанализировали эту корреляцию с помощью формулы для магнитного вклада в $\chi(0)$, полученной в работе [2] (D – модуль дипольного момента электронного перехода $i \rightarrow f$, n_i – концентрация электронов в состоянии i , ζ – константа спинорбитального взаимодействия, H – магнитное поле, μ_B – магнетон Бора, E_{fi} – энергия перехода $i \rightarrow f$)

$$\chi_M = 2 \cdot \frac{D^2 n_i \left(\frac{\zeta}{2} - \mu_B H \right)^2}{E_{fi}^3} \quad (1)$$

Делая замену $\mu_B H \rightarrow \zeta' gJ$, вводя линейную аппроксимацию для «лантаноидного сжатия» $E_{fi} = \xi(Z - c)$, и переходя к безразмерным константам $a = 2D^2 n_i \zeta^2 / \xi$ и $b = \zeta / 2 \zeta'$, получаем из (1) выражение с тремя подгоночными параметрами ($a = 290.5$, $b = 3.95$, $c = 56.7$)

$$\chi_M = a \cdot \frac{(b - gJ)^2}{(Z - c)^3} \quad (2)$$

вполне согласующееся с экспериментом (см. рис. 1). При этом разумные значения энергетического параметра ξ (десятичные доли эВ) возможны лишь если силовая константа ζ' имеет такой же порядок величины (величины спин-орбитального взаимодействия в РЗЭ).

Выводы

Соотношение (2) может объяснить экспериментально обнаруженную квадратичную по магнитному моменту иона добавку к статической электронной поляризуемости оксидов железа [3,4] и редкоземельных элементов [5] и позволяет в

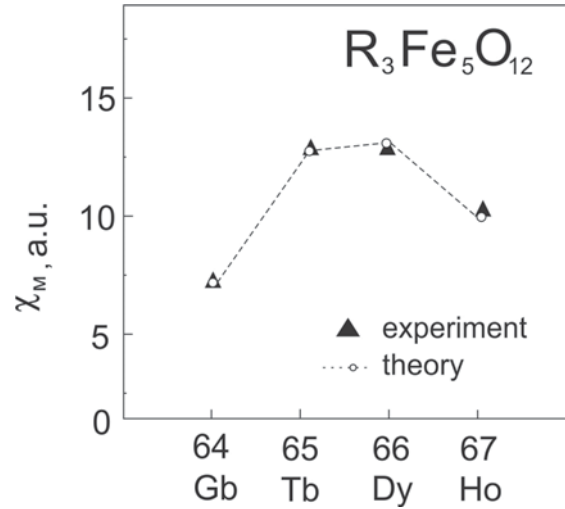


Рис. 1. Магнитный вклад χ_M в статическую диэлектрическую восприимчивость ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$, полученный экспериментально (величина χ_{4f} из таблицы 1), и рассчитанный по формуле (2) с подгоночными параметрами $a=290.5$, $b=3.95$, $c=56.7$.

трехпараметрическом приближении качественно воспроизвести экспериментальные значения магнитного вклада в статическую диэлектрическую восприимчивость ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$ (рис. 1).

1. А.В. Beznosov, А.І. Galuza, V.V. Eremenko. Advances in magnetooptics II, ed. By V.V. Eremenko, А.В. Beznosov, Kharkov (1992), p. 183.
2. А.Б. Безносков, Е.С. Орел. ФНТ, **27**, 5, 508 (2001).
3. А.В. Малаховский. Избранные вопросы оптики и магнитооптики соединений переходных элементов, Наука, Н. (1992), 219с.
4. А.В. Beznosov, V.V. Eremenko, А.І. Galuza. Abstracts of the International conference on magnetism, USA, San Francisco (1985), p. 67.
5. Ю.А. Изюмов. УФН, **171**, 121 (2001).

Таблица 1.

Электронный вклад в статическую диэлектрическую восприимчивость в расчете на формульную единицу χ_{mol} , а также составляющие χ_{mol} , вносимые атомами редкоземельных элементов и Y (χ_R) и соответствующими $4f$ -оболочками (χ_{4f}), гранатов $R_3Me_5O_{12}$ ($R=Y, Gd, Tb, Dy, Ho; Me=Fe, Ga$), выраженные в атомных единицах; Z – атомный номер РЗЭ; S, L, J и gJ – спин, орбитальный момент, полный момент и магнитный момент (в магнетонах Бора) $4f$ -оболочки РЗЭ, соответственно; V_R – объем кристалла, приходящийся на атом РЗЭ и Y.

RMeG	χ_{mol} а.е.	χ_R а.е.	χ_{4f} а.е.	Z	S	L	J	gJ	$(3/4\pi) V_R$ а.е.
YIG	495	32	0	39	0	0	0	0	53
GdIG	520	39	7	64	7/2	0	7/2	7	53
TbIG	538	45	13	65	3	3	6	9	52
DyIG	535	44	13	66	5/2	5	15/2	10	51
HoIG	522	40	10	67	2	6	8	10	50
YGG	320	32	0	39	0	0	0	0	53
GdGG	335	39	7	64	7/2	0	7/2	7	53