

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПРОЗРАЧНОГО МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКА НА ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТАХ. – ЭКСПЕРИМЕНТ.

А.С.Трифонов, А.Н.Агеев, В.Н.Гриднев, Г.А.Смоленский

Методом волноводного распространения света проведено непосредственное измерение недиагональных компонент тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей феррита-граната состава $(\text{YbPr})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$.

Одним из интересных и до конца не ясных вопросов оптики магнитоупорядоченных диэлектриков является проблема магнитной проницаемости на оптических частотах. В работах ^{1,2} развивалась точка зрения, согласно которой магнитная проницаемость ферритов-гранатов в области их прозрачности не является пренебрежимо малой величиной и может давать вклад в фарадеевское вращение, достигающий десятков градусов на сантиметр. Физический смысл магнитной проницаемости на оптических частотах, а также целесообразность ее введения подробно обсуждались в работах ^{4,5}.

Поскольку для рассматриваемых в ^{1,2} объемных эффектов, каким, в частности, является эффект Фарадея, недиагональные компоненты тензоров диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей вносят аддитивные вклады, для их разделения необходимо привлечение определенных модельных представлений. В работе ³ показано, что в рамках феноменологической теории магнитного резонанса величина фарадеевского вращения, связанная с тензором μ , не зависит от частоты в широкой области частот выше резонансной. Именно это свойство и позволило авторам ^{1,2} связать экспериментально наблюдаемый частотно-независимый эффект Фарадея с магнитной проницаемостью.

Однако, до сих пор, по нашим сведениям, не существовало эксперимента, который непосредственно подтверждал бы наличие магнитной проницаемости в прозрачных ферромагнетиках.

Возможность разделения вкладов возникает при распространении света в неоднородной среде, например, при волноводном распространении света в тонкой магнитной пленке, что и использовано в настоящей работе. Физические основы волноводного метода подробно рассмотрены в ^{4,5}, здесь мы лишь кратко сформулируем его суть.

В тонкой пленке феррита-граната (симметрия O_h), выращенной на подложке с меньшим показателем преломления, может распространяться свет в виде собственных TE и TM мод. Положим, что ось x перпендикулярна плоскости пленки, а свет распространяется вдоль оси z , тогда y -компоненты полей этих мод (без учета намагниченности) описываются соотношени-

ями:

$$\begin{aligned} E_y(x, z, t) &= \mathcal{E}(x) \exp(iN_e z - i\omega t), \\ H_y(x, z, t) &= \mathcal{H}(x) \exp(iN_h z - i\omega t), \end{aligned} \quad (1)$$

где N_e, N_h — эффективные показатели преломления TE и TM мод соответственно. Если направить намагниченность вдоль оси y и учесть ее влияние на поля мод, то в первом приближении по недиагональным компонентам ϵ и μ соотношения (1) останутся без изменений, однако постоянные N_e и N_h приобретут приращения:

$$\begin{aligned} \delta N_e &= iN_e(\mu_{xz} - \mu_{zx}) \int \mathcal{E}(x) \frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} dx, \\ \delta N_h &= i \frac{N_h}{n_f^2} (\epsilon_{xz} - \epsilon_{zx}) \int \mathcal{H}(x) \frac{d\mathcal{H}(x)}{dx} dx, \end{aligned} \quad (2)$$

где n_f — показатель преломления пленки.

В отсутствие потерь линейные по намагниченности части тензоров ϵ и μ антисимметричны и чисто мнимы: $\epsilon_{ik}^a = if_e e_{iks} M_s, \mu_{ik}^a = if_m e_{iks} M_s$. Если вектор намагниченности \mathbf{M} направлен вдоль оси y , то $\delta N_e \sim f_m M_y, \delta N_h \sim f_e M_y$. Как видно из этих соотношений, знак приращений эффективных показателей преломления изменяется на противоположный при изменении знака M_y . Таким образом, измерение δN_e и δN_h при перемагничивании пленки вдоль оси y дает возможность раздельного определения недиагональных компонент тензоров ϵ и μ . Обратим внимание на то, что поскольку данный эффект является линейным по намагниченности, его можно легко отделить от квадратичного по намагниченности эффекта Фойгта, который также может дать вклад в изменение N_e и N_h .

Измерения проводились на пленке состава $(YbPr)_3(FeGa)_5O_{12}$, выращенной эпитаксиально на подложке гадолиний-галлиевого граната ориентации $\{111\}$, имеющей тип магнитной анизотропии "легкая плоскость". Длина волны света — 1,15 мкм. Для ввода и вывода света использовались рутиловые призмы. Измерение спектров мод в данной пленке показало, что в ней могут распространяться 7 TE и 7 TM мод. По спектру мод были определены показатели преломления $n_f^{TE} = 2,17538, n_f^{TM} = 2,17700$ и толщина пленки $W = 3,82$ мкм. Эти значения были использованы для вычисления интегралов перекрытия полей мод в (2). Различие в показателях преломления TE и TM мод связано в основном с напряжениями в пленке, приводящими к оптической анизотропии из-за фотоупругого эффекта⁴. Далее, пленка помещалась в переменное магнитное поле ($f = 2500$ Гц), направленное вдоль оси y , и с помощью специального устройства, чувствительного к малым отклонениям луча, определялись поочередно изменения N_e и N_h для мод с номерами $k = 4, 5, 6$. Затем, по формулам (2) были определены мнимые части недиагональных компонент тензоров ϵ и μ и определено удельное фарадеевское вращение, соответствующее этим компонентам. Полученные значения приведены в таблице. Отметим, что определенные таким образом гирозлектрическая и гиромангнитная части эффекта Фарадея имеют различный знак.

k	N_e	N_h	$\delta N_e \cdot 10^7$	$\delta N_h \cdot 10^7$	$\theta_F^e (^\circ/\text{см})$	$\theta_F^m (^\circ/\text{см})$
4	2,0609	2,0572	0,68	20,8	-399,9	14,2
5	2,0093	2,0042	1,24	32,5	-405,6	18,6
6	1,9481	1,9461	1,12	36,6	-404,9	14,3

Следует указать, что данный эксперимент принципиально возможно описать введением эффективного тензора диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ ⁶, содержащего оба независимые параметра f_e и f_m , однако это внесло бы неоправданные усложнения, поскольку

такой тензор имеет особенности типа δ -функции на границах пленки, что эквивалентно введению поверхностного тока (связанного с f_m).

Таким образом, в настоящей работе показано, что при волноводном распространении света в эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов может быть проведено раздельное измерение недиагональных компонент тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей, и что недиагональные компоненты тензора μ оказываются отличными от нуля в оптическом диапазоне частот.

Литература

1. Кринчик Г.С., Четкин М.В. ЖЭТФ, 1959, 36, 1924.
2. Кринчик Г.С., Четкин М.В. ЖЭТФ, 1961, 41, 673.
3. Wangness R.K. Phys. Rev., 1954, 95, 339.
4. Прохоров А.М., Смоленский Г.А., Агеев А.Н. УФН, 1984, 143, 33.
5. Агеев А.Н., Гриднев В.Н., Руткин О.Г., Смоленский Г.А. ФТТ, 1983, 25, 478.
6. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1979.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 июня 1986 г.