

## Эффекты пространственной дисперсии в магнитооптике

© В.Н. Гриднев, Б.Б. Кричевцов, В.В. Павлов, Р.В. Писарев, А.А. Ржевский

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты экспериментального исследования невязанных эффектов пространственной дисперсии в пара- ( $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ), ферро- ( $\text{LiFe}_5\text{O}_8$ ) и антиферромагнитных кристаллах ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), обусловленных внешним магнитным полем или магнитным порядком.

В веществах, группа симметрии которых не содержит операций обращения времени и инверсии пространства, могут наблюдаться оптические явления, запрещенные в centrosymmetric или немагнитных средах. Такие явления впервые наблюдались в [1,2] и затем в [3,4] в экситонной области спектра. В общем виде эти эффекты описываются членами разложения тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$  по компонентам волнового вектора света  $\mathbf{k}$  и вектора  $\mathbf{G}$ , нечетного по отношению к операции обращения времени и определяющего магнитное состояние кристалла [5]:

$$\Delta\epsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{G}) = \gamma_{ijkl}k_kG_l. \quad (1)$$

Вектор  $\mathbf{G}$  может обозначать внешнее магнитное поле  $\mathbf{B}$  или магнитный параметр порядка, например, спон-

танную намагниченность  $\mathbf{M}$  или антиферромагнитный вектор  $\mathbf{L}$ . Члены (1) приводят к появлению магнитооптических эффектов в прохождении и отражении света в тех случаях, когда традиционные магнитооптические явления запрещены, что открывает новые возможности для исследования электронных состояний в кристаллах.

С позиций микроскопической теории существование членов (1) определяется действием различных механизмов. Отсутствие операций инверсии и обращения времени приводят к изменению волновых функций основного и возбужденных состояний и появлению отличных от нуля комбинаций матричных элементов типа  $\text{Re } d_{knm_{nk}}$  и  $\text{Re } d_{kn}Q_{nk}$ , где  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{m}$  и  $\mathbf{Q}$  — операторы электрического, магнитного и квадрупольного момента.  $\text{Re } d_{knm_{nk}}$  обуславливает магнитоэлектрическую воспри-

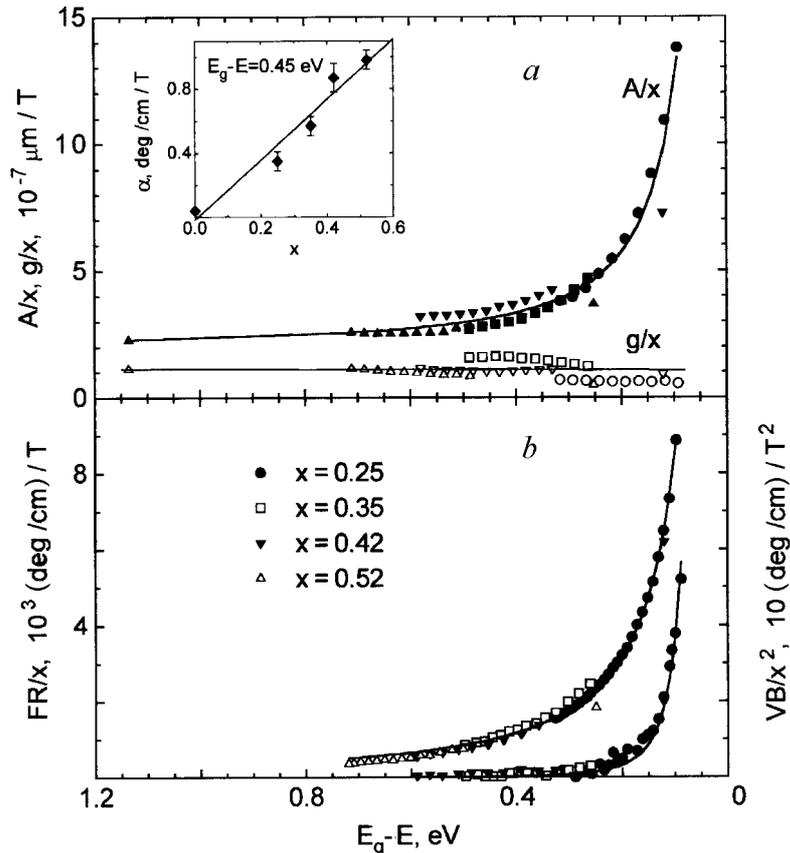
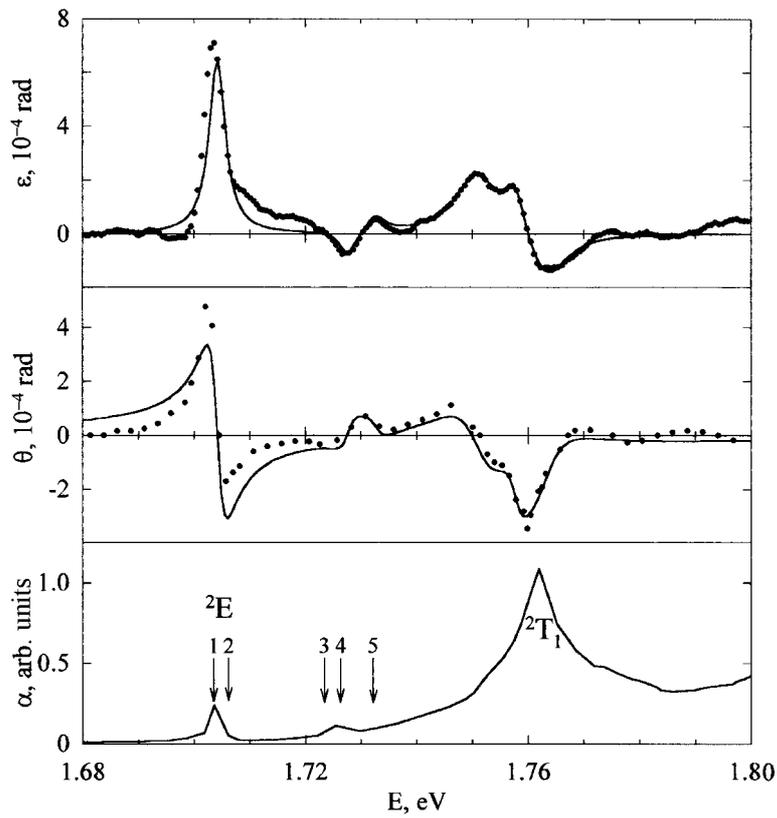
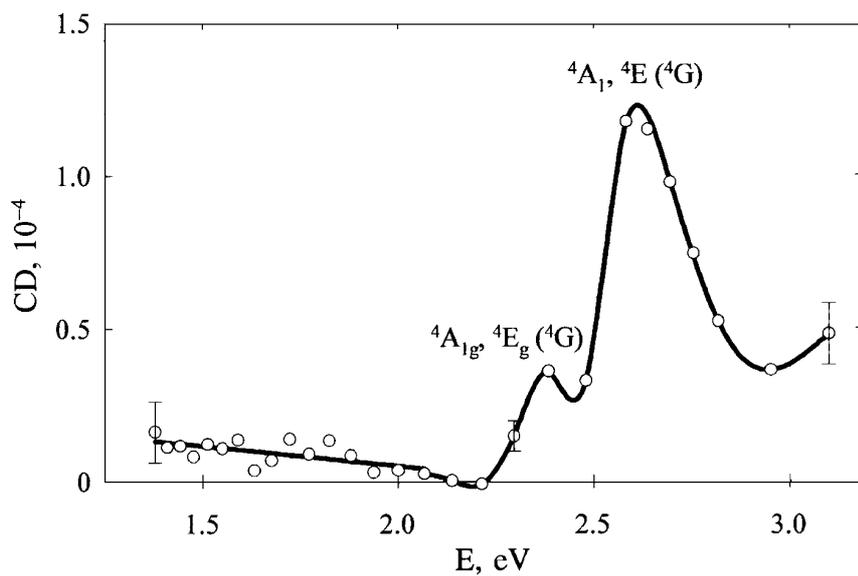


Рис. 1. Спектральные зависимости  $A/x$  и  $g/x$  (а), эффекта Фарадея  $FR/x$  и магнитного линейного дупреломления  $VB/x^2$  (б), как функции  $E_g - E$  в кристаллах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .



**Рис. 2.** Невзаимная эллиптичность  $\epsilon$  и поворот плоскости поляризации  $\theta$  при отражении света от базисной плоскости  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при  $T = 90 \text{ K}$  в области спин-запрещенных  ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E$ ,  ${}^4A_2 \rightarrow {}^2T_1$  переходов. Внизу приведен спектр поглощения ( $T = 77 \text{ K}$ ).



**Рис. 3.** Спектральная зависимость кругового дихроизма в отражении света от плоскости типа (111) при нормальном падении и поперечном намагничивании в  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$ .

имчивость  $\alpha_{ij}$  на оптических частотах, которая при учете в уравнениях связи [6]:

$$D_i = \varepsilon_{ij}E_j + \alpha_{ij}H_j, \quad B_i = \mu_{ij}H_j + \alpha_{ij}E_j \quad (2)$$

дает вклад в компоненты  $\Delta\varepsilon_{ij}$  и может проявляться в кристаллах, обладающих спонтанным магнитоэлектрическим эффектом. Ре  $d_{kn}Q_{nk}$  определяет квадрупольный вклад в  $\Delta\varepsilon_{ij}$ . Другим возможным механизмом появления членов (1) является линейная зависимость резонансных частот оптических переходов от  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{G}$  для экситонных и межзонных переходов в полупроводниках. В данной работе приводятся результаты спектральных исследований магнитооптических эффектов пространственной дисперсии в пара- ( $\mathbf{G} = \mathbf{B}$ ), ферро- ( $\mathbf{G} = \mathbf{M}$ ) и антиферромагнитных ( $\mathbf{G} = \mathbf{L}$ ) кристаллах.

В области прозрачности нецентросимметричных параили диамагнетиков члены (1) приводят к появлению невязимного двупреломления, линейного по  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{k}$ , которое в кристаллах кубической симметрии ( $T_d$ ) описывается двумя параметрами,  $A$  и  $g$ , определяющими диагональные и недиагональные компоненты тензора  $\Delta\varepsilon_{ij}$ . Двупреломление типа  $\mathbf{kB}$  обнаружено в полумагнитных полупроводниках  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x = 0, 0.25, 0.35, 0.42, 0.52$ ) в геометриях  $\mathbf{k} \parallel [110]$  и  $[111]$ . Эффект характеризуется сильной анизотропией по отношению к направлению  $B$  и описывается гармониками 1-го и 3-го порядка. На рис. 1 представлены зависимости приведенных параметров  $A/x$  и  $g/x$  от  $E_g - E$ , где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны,  $E$  — энергия фотона. Там же приведены зависимости приведенных значений эффекта Фарадея  $FR/x$  и магнитного линейного двупреломления  $VB/x^2$ .  $\mathbf{kB}$ -двупреломление линейно зависит от  $x$ , что свидетельствует об определяющей роли  $sp-d$ -обмена в образовании эффекта. Диагональная компонента  $\gamma_{ijkl}$  вблизи края зоны имеет резонансную зависимость  $A/x = d + c/(E_g - E)^{1.4}$ . Величина недиагональной компоненты  $g/x$  вблизи края мала и не имеет резонансного характера. Такое поведение согласуется с микроскопической теорией, в которой  $\mathbf{kB}$ -эффект связывается с межзонными переходами, с линейной по  $\mathbf{k}$  дисперсией энергии дырок и зависимостью параметра обменного взаимодействия от волнового вектора электронов.

На рис. 2 представлены спектральные зависимости невязимного поворота плоскости поляризации  $\theta$  и эллиптичности  $\varepsilon$  при отражении света от базисной плоскости антиферромагнетика  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $D_{3d}(D_3)$ ) в области экситонных переходов  ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E, {}^2T_1$  [7,8]. Нарушение операций инверсии и обращения времени в  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  связано с появлением антиферромагнитного порядка ( $\mathbf{L} \parallel C_3$ ). Невязимные эффекты, линейные по  $\mathbf{L}$ , обусловлены магнитоэлектрической восприимчивостью  $\alpha_{\perp}$  на оптических частотах:  $\theta + i\varepsilon = 2\alpha_{\perp}(1+n)/(1-n)$ , где  $n$  — показатель преломления. Микроскопическая теория магнитоэлектрической восприимчивости в оптическом диапазоне в  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  развита в [9].

На рис. 3 представлена спектральная зависимость невязимного кругового дихроизма (CD) в отражении света от плоскости типа (111) нецентросимметричного кубического  $O^6$  ферримагнетика  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$  в области переходов в ионе  $\text{Fe}^{3+}$ :  ${}^6A_1 \rightarrow {}^4A_1, {}^2E({}^4G)$  в октаэдрических и тетраэдрических позициях. Спектры получены при нормальном падении света и перпендикулярном намагничивании кристалла в плоскости  $(111) \mathbf{M} \perp C_3$ . Наблюдаемые спектры могут быть связаны с магнитоэлектрической восприимчивостью в оптическом диапазоне и с кубическим по  $\mathbf{M}$  эффектом Керра. Феноменологическое рассмотрение показало, что основной вклад в эффект дает магнитоэлектрический механизм [10].

Работа поддержана РФФИ и программой "Фундаментальная спектроскопия".

## Список литературы

- [1] Е.Ф. Гросс, Б.П. Захарченя, О.В. Константинов. ФТТ 3 1, 305 (1961).
- [2] J.J. Hopfield, D.G. Thomas. Phys. Rev. Lett. 4, 357 (1960).
- [3] Е.Л. Ивченко, В.П. Кочерешко, Г.В. Михайлов, И.Н. Уралцев. Письма в ЖЭТФ 37, 137 (1983).
- [4] О.В. Гоголин, В.А. Цветков, Е.Г. Цицишвили. ЖЭТФ 87, 1038 (1984).
- [5] В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. Наука, М. (1979).
- [6] R.M. Hornreich, S. Shtrikman. Phys. Rev. 171, 1065 (1968).
- [7] В.В. Кричевцов, В.В. Павлов, Р.В. Писарев, В.Н. Гриднев. Phys. Rev. Lett. 76, 4628 (1996).
- [8] Б.Б. Кричевцов, В.В. Павлов, Р.В. Писарев, В.Н. Гриднев. ЖЭТФ 110, 1505 (1996).
- [9] E. Hanamura, Y. Tanabe, T. Iizuka-Sakano, M. Muto. In press.
- [10] В.Н. Гриднев, Б.Б. Кричевцов, В.В. Павлов, Р.В. Писарев. Письма в ЖЭТФ 65, 65 (1997).