

Анизотропия угла фарадеевского вращения в Fe-содержащем полумагнитном полупроводнике

© С.В. Мельничук, О.С. Мельничук, А.И. Савчук, Д.Н. Трифоненко

Черновицкий государственный университет им. Ю. Федыковича,
274012 Черновцы, Украина

(Получена 22 марта 1996 г. Принята к печати 13 июня 1996 г.)

Теоретически и экспериментально исследуются магнитополевая и температурная зависимости угла фарадеевского вращения в кубическом кристалле $Cd_{1-x}Fe_xTe$. Показано, что одновременный учет спин-орбитального и зеемановского взаимодействий без использования теории возмущений позволяет в едином подходе объяснить анизотропный характер указанных зависимостей в сильных магнитных полях.

Полумагнитные полупроводники (ПМП), содержащие магнитную компоненту Fe, характеризуются рядом отличительных особенностей. Одна из них заключается в проявлении анизотропного характера намагниченности, что становится особенно существенным в сильных магнитных полях при температуре жидкого гелия. В свою очередь, как показано в [1], это приводит к анизотропии эффекта Фарадея в кубическом кристалле $Cd_{1-x}Fe_xTe$. Для объяснения анизотропии намагниченности данного материала в сильных магнитных полях существуют различные подходы [2,3].

В данной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования эффекта Фарадея в $Cd_{1-x}Fe_xTe$. Измерения угла фарадеевского вращения проводились на образцах с концентрацией Fe $x = 0.03$, предварительно ориентированных вдоль кристаллографических осей [100] и [111] при температурах $4.2 \div 100$ К. В сильных магнитных полях до 200 кГс наблюдалась анизотропия температурной зависимости постоянной Верде, составляющая $\sim 20\%$.

Монокристаллы $Cd_{1-x}Fe_xTe$ ($x \leq 0.05$) были выращены видоизмененным методом Бриджмена и методом горизонтально направленной кристаллизации. Состав твердых растворов задавался загрузкой исходных компонент и контролировался с помощью методов атомно-абсорбционного и микрозондового анализа. Дополнительный контроль за составом используемых образцов осуществлялся путем наблюдения экситонной структуры в спектре отражения кристаллов при 4.2 К. Образцы для магнитооптических исследований представляли собой вырезанные в плоскостях (100) и (111) пластинки толщиной $d = 0.2 \div 3.0$ мм.

Измерения угла фарадеевского вращения θ_F выполнялись с использованием сильного магнитного поля с максимальной напряженностью до 200 кЭ, которое создавалось импульсным магнитом, представляющим собой медный соленоид с внутренним диаметром 6 мм и батарее конденсаторов с общей емкостью $C = 2400$ мкФ и рабочим напряжением до 5 кВ. Исследуемый образец монтировался в центре соленоида вместе с пробной катушкой и Ge-датчиком для контроля за напряженностью поля H и температурой соответственно. Использование гелиевого оптического криостата и терморегулируемой

системы УТРЕКС позволило проводить измерения в интервале температур $5 \div 295$ К.

Результаты измерений магнитополевой зависимости угла фарадеевского вращения для различных направлений магнитного поля представлены на рис. 1. Температурная зависимость постоянной Верде приведена на рис. 2. Установлено, что анизотропия угла θ_F и постоянной Верде V при низких температурах и полях ~ 200 кГс составляет примерно 20%.

При теоретическом рассмотрении вопроса исходим из того, что основным состоянием изолированного иона Fe^{2+} , который имеет конфигурацию $3d^6$, является терм 5D . В кристаллическом поле симметрии T_d терм расщепляется на орбитальный дублет 5E и орбитальный триплет 5T_2 . В присутствии внешнего магнитного поля с учетом спин-орбитального взаимодействия гамильтониан иона Fe^{2+}

$$H = H_0 + H_{CF} + \lambda LS + \mu_B \mathbf{B}(\mathbf{L} + 2\mathbf{S}),$$

где H_0 — гамильтониан изолированного атома, H_{CF} учитывает кристаллическое поле, λ — коэффициент спин-орбитального взаимодействия. В приближении эквивалентных операторов H_{CF} [4]

$$H_{CF} = A \left[\frac{1}{8}(L_+^2 + L_-^2)^2 + \frac{3}{2}L_z^4 - 6L_z^2 - \frac{12}{5} \right],$$

$$L_{\pm} = L_x \pm iL_y, \quad (2)$$

A — константа, характеризующая взаимодействие примесного иона Fe с кристаллическим окружением. Базисные функции орбитальных термов 5E и 5T_2 имеют вид [4]

$$\begin{aligned} {}^5E: \quad & u_1 = |0\rangle, \\ & u_2 = (1/\sqrt{2})(|2\rangle + |-2\rangle); \\ {}^5T_2: \quad & v_1 = |-1\rangle, \\ & v_2 = (1/\sqrt{2})(|2\rangle - |-2\rangle), \\ & v_3 = |-1\rangle. \end{aligned} \quad (3)$$

В отсутствие внешнего магнитного поля спин-орбитальное взаимодействие приводит к расщеплению орбитального дублета 5E во втором порядке теории возмущений на уровни Γ_1 , Γ_4 , Γ_3 , Γ_5 , Γ_2 , энергетическое расстояние между которыми $6\lambda^2/\Delta$ (для Fe

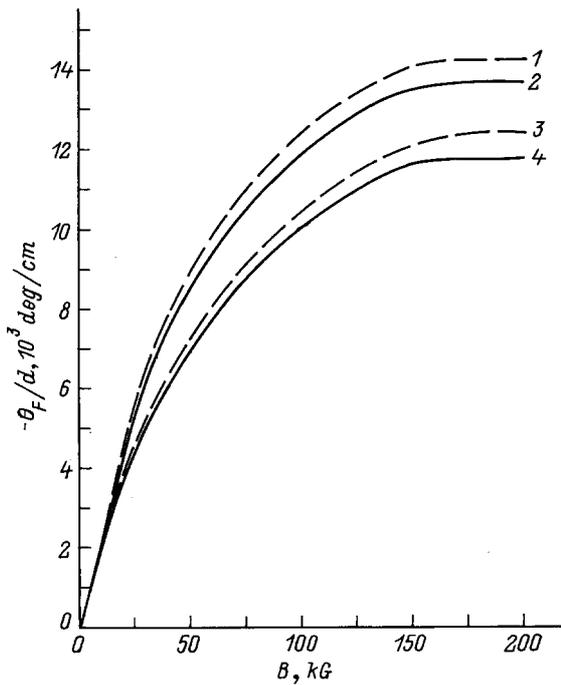


Рис. 1. Зависимость угла фарадеевского вращения от магнитного поля в $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ ($x = 0.03$) при температуре $T = 5 \text{ K}$, энергии фотонов $E = 1.459 \text{ эВ}$ для различной ориентации \mathbf{B} относительно кристаллографических осей. 2, 4 — результаты эксперимента для ориентаций $[100]$ и $[111]$ соответственно; 1, 3 — результаты расчета для тех же ориентаций.

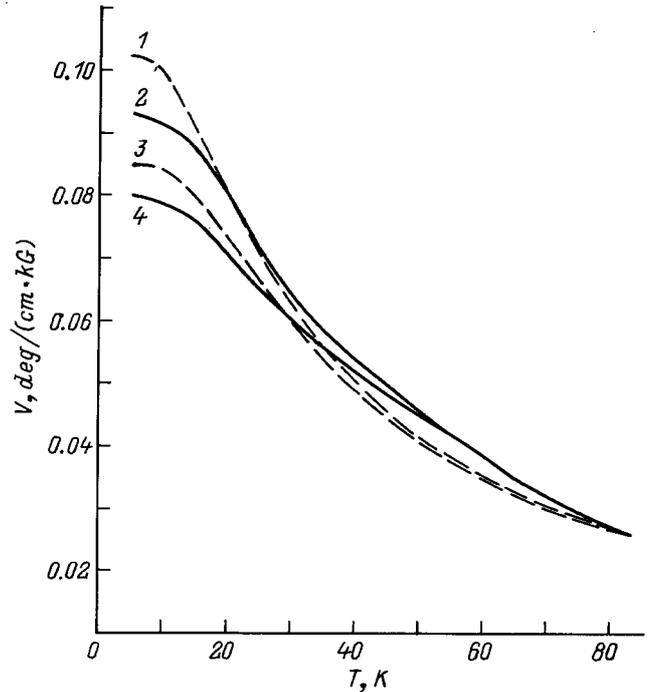


Рис. 2. Температурная зависимость константы Верде V в $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ ($x = 0.03$) в магнитном поле $B = 135 \text{ кГс}$, при энергии фотонов $E = 1.459 \text{ эВ}$ для различной ориентации \mathbf{B} относительно кристаллографических осей. 2, 4 — результаты эксперимента для ориентаций $[100]$ и $[111]$ соответственно; 1, 3 — результаты расчета для тех же ориентаций.

$\Delta = 6A = 2500 \text{ см}^{-1}$ и $\lambda = -100 \text{ см}^{-1}$) составляет $\sim 24 \text{ см}^{-1}$. В сильных магнитных полях $B \simeq 150 \text{ кГс}$ $\mu_B B \simeq 10 \text{ см}^{-1}$. Поскольку приведенные энергетические расстояния имеют один и тот же порядок величины, это приводит к необходимости одновременного учета спин-орбитального и зеемановского взаимодействий.

В базисе (3) гамильтониан (1) будет иметь вид

$$H = \begin{bmatrix} E_0(^5E) + 2\mu_B B \mathbf{nS} & (\lambda S + \mu_B B \mathbf{n}) \mathbf{U} \\ (\lambda S + \mu_B B \mathbf{n}) \mathbf{U}^+ & E_0(^5T_2) + 2\mu_B B \mathbf{nS} - (\lambda S + \mu_B B \mathbf{n}) \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $E_0(^5E)$ и $E_0(^5T_2)$ — собственные значения H_{CF} ($E_0(^5T_2) - E_0(^5E) = \Delta$), \mathbf{n} — единичный вектор, задающий направление магнитного поля,

$$\mathbf{U}_{vk} = \langle u_v, \mathbf{L}v_k \rangle, \quad \mathbf{I}_{kk'} = -\langle v_k, \mathbf{L}v_{k'} \rangle. \quad (5)$$

Подставляя явный вид матричных элементов (5) в базисе (3) и используя спиновые функции ($M_S = -2, -1, 0, 1, 2$), получим матрицу гамильтониана (4), размерность которой 25×25 . Такой подход не использует теорию возмущений и позволяет учесть перемешивание термов 5E и 5T_2 . На рис. 3 приведена магнитополевая зависимость спин-орбитальных термов, которые получены из орбитального дублета 5E .

Расчет угла фарадеевского вращения производим согласно [5]:

$$\theta_F = \frac{F_0^{1/2} d}{2\hbar c} \frac{E^2}{(E_0^2 - E^2)^{3/2}} \frac{(J_h - J_e)}{g\mu_B} M. \quad (6)$$

Здесь J_e, J_h — интегралы обменного взаимодействия электронов и дырок с моментами ионов Fe; E_0 — энергия экситонного перехода; E — энергия фотонов; F_0 — постоянная, в которую входит сила осциллятора экситонного перехода; g — g -фактор иона Fe^{2+} , M — намагниченность единицы объема,

$$M = xk_B T \frac{\partial}{\partial B} \ln Z, \quad (7)$$

x — концентрация ионов Fe^{2+} , Z — статистическая сумма, которая находится с помощью полученных в магнитном поле энергетических спектров (рис. 3).

Результаты расчета магнитополевой и температурной зависимостей угла фарадеевского вращения сравниваются с экспериментальными данными на рис. 1 и 2. Как видно из приведенных зависимостей, имеет место удовлетворительное согласие экспериментальных и теоретических результатов. Анизотропия фарадеевского вращения связана с особенностями поведения спин-орбитальных уровней в сильных магнитных полях (рис. 3). Нижний

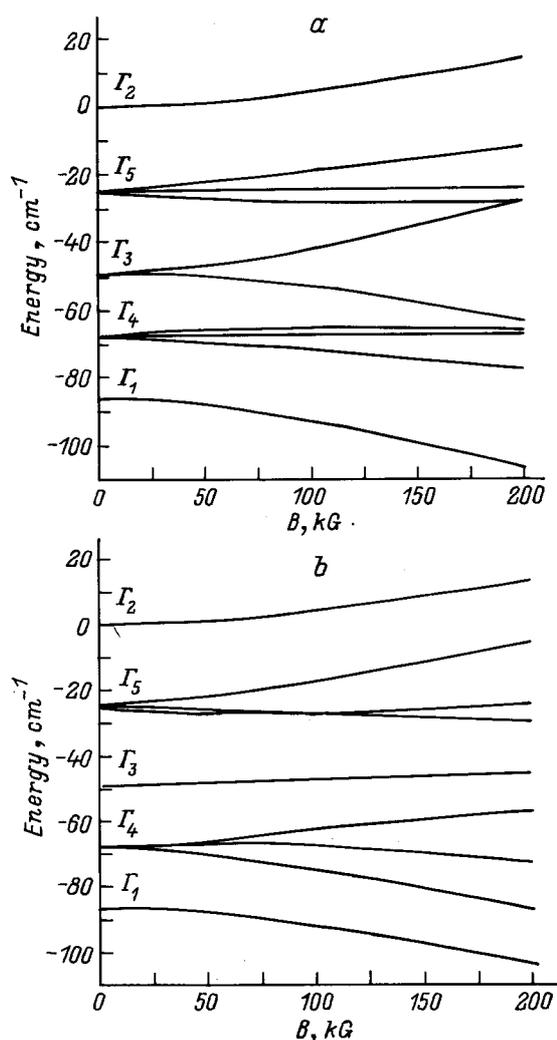


Рис. 3. Магнитолевая зависимость спин-орбитальных уровней, происходящих от орбитального термина E для $\mathbf{B} \parallel [100]$ (а) и $\mathbf{B} \parallel [111]$ (б).

уровень Γ_1 является слабо анизотропным, величина расщепления последующего уровня Γ_4 существенно различна для ориентаций поля $\mathbf{B} \parallel [100]$ и $\mathbf{B} \parallel [111]$, уровень Γ_3 при направлении поля $\mathbf{B} \parallel [111]$ остается двукратно вырожденным, в то время как в поле $\mathbf{B} \parallel [100]$ имеет место заметное его расщепление.

Отметим, что в работах [4,6,7] уже использовались различные варианты теории возмущений с учетом или без учета перемешивания различных орбитальных уровней для объяснения анизотропии намагниченности. Однако энергетический спектр, полученный, например, в [4], не позволяет с единых позиций объяснить указанные особенности. Таким образом, одновременный учет спин-орбитального и зеемановского взаимодействий является оправданным, поскольку позволяет в едином подходе описать как анизотропию угла фарадеевского вращения, так и особенности низкотемпературной зависимости постоянной Верде.

Список литературы

- [1] A.I. Savchuk, O.R. Klichuk, P.I. Nikitin. *Japan. J. Appl. Phys.*, **32**, 393 (1993).
- [2] C. Testelin, A. Mauger, C. Rigaux, M. Guillot, A. Mycielski. *Sol. St. Commun.*, **71**, 923 (1989).
- [3] S. Rodrigues, M. Villeret, E. Kartheuser. *Phys. Scripta*, **39**, 131 (1991).
- [4] M. Villeret, S. Rodrigues, E. Kartheuser. *Phys. Rev. B*, **41**, 10028 (1990).
- [5] П.И. НИКИТИН, А.И. САВЧУК. *УФН*, **160**, вып. 11, 167 (1990).
- [6] M. Villeret, S. Rodrigues, E. Kartheuser. *Phys. Rev. B*, **43**, 3443 (1991).
- [7] C. Testelin, C. Rigaux, A. Mauger, A. Mycielski, M. Guillot. *Phys. Rev. B*, **46**, 2193 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

Anisotropic Faraday rotation angle for Fe-based diluted magnetic semiconductor

S.V. Melnychuk, O.S. Melnychuk, A.I. Savchuk, D.N. Tryfonenko

State University,
274012 Chernivtsi, Ukraine

Abstract The Faraday rotation angle in the cubic crystal $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ as a function of magnetic field and temperature is investigated both theoretically and experimentally. It has been shown that simultaneous consideration of the spin-orbital and the Zeeman interactions make it possible to explain the anisotropy of the functions in question in high magnetic fields.

E-mail: gorley@chsu.chernovtsy.ua