

## СТУПЕНЧАТАЯ МАГНИТОПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ В ПОЛУМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*П.И.Никитин, А.И.Савчук, Б.Е.Деркач*

Впервые сообщается о ступенчатом характере магнитополевой зависимости фарадеевского вращения (ФВ) полумагнитных полупроводников (ПМП)  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  и  $Pb_{1-x}Mn_xI_2$  в полях до 250 кЭ. Показана связь обнаруженных аномалий со ступенчатым изменением намагниченности магнитной подсистемы ПМП.

Многочисленные исследования эффекта Фарадея в ПМП позволили наблюдать целый ряд аномалий, присущих этому классу веществ<sup>1-5</sup>. В настоящей работе обнаружен ступенчатый характер изменения ФВ при увеличении магнитного поля.

Эксперименты проводились как с достаточно известными ПМП  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , так и с новым типом ПМП  $Pb_{1-x}Mn_xI_2$  при температуре  $T = 4,2$  К в импульсных магнитных полях до  $H = 250$  кЭ. Образцы приготовлены скальванием монокристаллических пластинок толщиной  $d \approx 100$  мкм.

На рис.1 показана зависимость угла ФВ  $\theta$  от величины поля для состава  $Cd_{0,95}Mn_{0,05}Te$ . Как следует из рис.1, при  $H > 50$  кЭ начинается насыщение ФВ, а затем при  $H_1 \approx 100$  кЭ и  $H_2 \approx 180$  кЭ наблюдается ступенчатое изменение угла  $\theta$ .

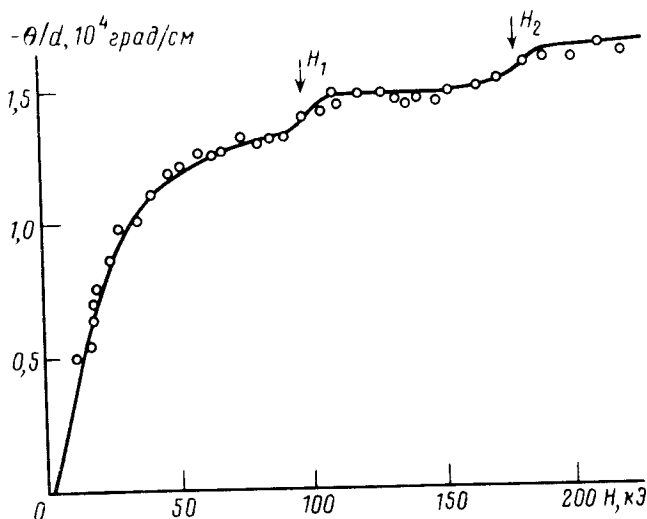


Рис. 1. Зависимость ФВ в  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  от напряженности магнитного поля при  $T = 4,2$  К для  $E = 1,35$  эВ,  $x = 0,05$ . Точки - эксперимент, линия-расчет по формуле (1)

Магнитополевая зависимость ФВ в ПМП с небольшим содержанием магнитной компоненты, когда не учитывается междуионное взаимодействие, должна иметь вид кривой с насыщением, что соответствует полному выстраиванию спинов изолированных ионов  $Mn^{2+}$  в больших полях <sup>1-4</sup>. Однако учет антиферромагнитного взаимодействия между ближайшими ионами, связанными в пары  $Mn^{2+} - Mn^{2+}$ , приводит к усложнению зависимости  $\theta(H)$ : при дальнейшем увеличении магнитного поля происходит дополнительное скачкообразное выстраивание спинов пар и соответствующее ступенчатое изменение намагниченности  $\langle S_M \rangle$  магнитной подсистемы ПМП. В рамках простой модели <sup>6,7</sup> описывающей взаимодействующую пару ионов совокупностью пересекающихся с ростом поля энергетических уровней, предсказано проявление пяти эквидистантных ступенек в зависимости  $\langle S_M \rangle (H)$ . Используя рассчитанное в этой модели соотношение для  $\langle S_M \rangle$ , ее связь с экситонным вкладом в ФВ согласно <sup>4</sup> и ограничиваясь рассмотрением только двух экспериментально наблюдаемых при  $H_1$  и  $H_2$  ступенек, находим

$$\frac{\theta}{d} = \frac{\sqrt{F_0}}{2\hbar c} \frac{E^2}{(E_0^2 - E^2)^{3/2}} [xN_0(J_e - J_h)] \left\{ \frac{5x^*}{2} B_{5/2} \left[ \frac{5\mu_B H}{k_B(T + T_0)} \right] - \frac{1}{2} P_p \left[ 1 + \exp \left[ \frac{2\mu_B H}{k_B T} (H_1 - H) \right] \right]^{-1} - \frac{1}{2} P_p \left[ 1 + \exp \left[ \frac{2\mu_B H}{k_B T} (H_2 - H) \right] \right]^{-1} \right\}, \quad (1)$$

где  $F_0$  - константа пропорциональная силе осциллятора экситонного перехода,  $E$  - энергия фотонов,  $E_0$  - энергия экситонного перехода,  $N_0$  - число катионных состояний в единице объема,  $J_{e,h}$  - интегралы обменного взаимодействия электронов (дырок) с ионами  $Mn^{2+}$ ,  $x^*$  - мольная доля изолированных ионов  $Mn^{2+}$ ,  $B_{5/2}(a)$  - бриллюэновская функция,  $T_0$  - поправка к температуре  $T$ , учитывающая междуионное обменное взаимодействие,  $P_p$  - вероятность существования пар ионов  $Mn^{2+}$ .

Построенная на основе выражения (1) расчетная кривая в целом удовлетворительно описывает экспериментальные результаты (рис.1). Расчеты проведены с использованием значений основных параметров:  $N_0(J_e - J_h) = 1,126$  эВ <sup>6</sup>;  $x^*/x = 0,604$ ;  $T + T_0 = 5$  К;  $P_p = 0,33$  <sup>6</sup>;  $H_1 = 100$  кЭ;  $H_2 = 180$  кЭ. Подчеркнем, что значения последних позволяют оценить константу обменного взаимодействия

$$J_{NN}/k_B = -\frac{1}{2}g_{Mn}\mu_B(H_2 - H_1) \approx -(5,4 \pm 0,5)K, \quad (2)$$

которая удовлетворительно согласуется с величиной ранее определенной из прямых измерений намагниченности кристаллов  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  <sup>7</sup>.

В случае кристаллов  $Pb_{1-x}Mn_xI_2$  ситуация интересна тем, что наряду с обменным вкладом в ФВ необходимо также учитывать противоположный по знаку линейный вклад, который отражает прямое зеемановское расщепление экситонных спиновых состояний. Отметим, что для  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  последним вкладом можно было пренебречь главным образом из-за существенно большего значения  $N_0(J_e - J_h)$ . Эта величина для  $Pb_{1-x}Mn_xI_2$  почти на два порядка меньше <sup>8</sup>, поэтому в сильных магнитных полях линейный вклад в  $\theta$  по абсолютной величине превышает обменный вклад.

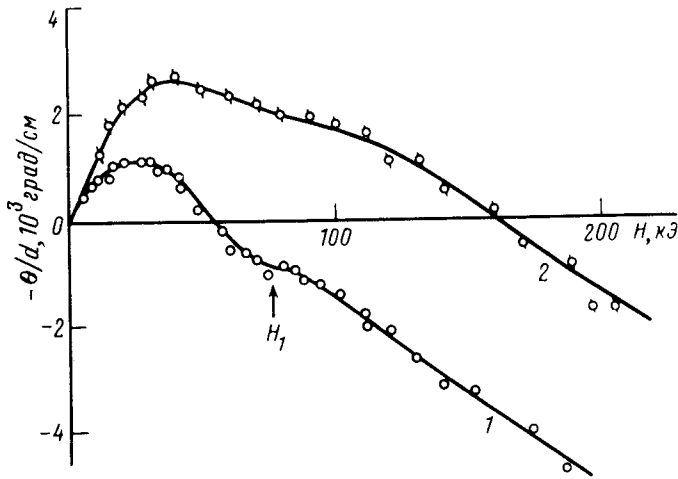


Рис. 2. Зависимость ФВ в  $Pb_{1-x}Mn_xI_2$  от напряженности магнитного поля при  $T = 4,2$  К для  $E = 2,27$  эВ. Точки и линии 1 - экспериментальные данные для состава  $x = 0,01$ ; 2 -  $x = 0,03$

Экспериментальные данные для  $Pb_{1-x}Mn_xI_2$  (рис.2) действительно свидетельствуют о доминирующей роли в больших полях прямого зеемановского вклада  $\mu_B g_{e,h} H$ . Кроме того, в интервале  $H \approx (65 - 85)$  кЭ обнаружено плато, которое, как и в предыдущем случае также можно интерпретировать ступенчатым характером магнитолевой зависимости намагниченности магнитной подсистемы в таких ПМП. Однако из-за сильного влияния линейного вклада в ФВ ступенька трансформируется в плато, по положению середины которого определялась величина  $H_1 \approx 75$  кЭ и оценивалась константа

$$J_{NN}/k_B = -\frac{1}{2}g_{Mn}\mu_B H_1 \approx (5,0 \pm 0,5)K. \quad (3)$$

С увеличением содержания  $Mn$  в твердых растворах  $Pb_{1-x}Mn_xI_2$  сложный характер магнитолевой зависимости ФВ сохраняется, но величина поля, при котором начинается спад  $\theta$  по мере роста  $x$  сдвигается в сторону больших  $H$ . Кроме того, для составов с  $x \geq 0,03$  плато на зависимости  $\theta(H)$  выражено уже менее отчетливо (рис.2, кривая 2).

В заключение отметим, что обнаруженные особенности магнитопольевой зависимости ФВ, связанные со ступенчатым изменением намагниченности подсистемы ионов  $Mn^{2+}$ , демонстрируют новые возможности эффекта Фарадея для изучения процессов обменного взаимодействия магнитных ионов как друг с другом, так и с зонными носителями в классе ПМП.

### Литература

1. Комаров А.В. и др. ЖЭТФ, 1977, 73, 608.
2. Gaj J.A. et al. Sol.Stat.Comm., 1978, 25, 193.
3. Губарев С.И. ЖЭТФ, 1981, 80, 1174
4. Bartholomev D.U. et al. Phys.Rev.B, 1986, 34, 6943.
5. Ватаманюк П.П. и др. ЖЭТФ, 1988, 94, 225.
6. Aggarwal R.L. et al. Phys.Rev.B, 1985, 32, 1120.
7. Shapira Y., Oliveira N.F. Phys.Rev.B, 1987, 35, 6888.
8. Савчук А.И., Деркач Б.Е. ФТТ, 1988, 30, 3171.