

## НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ В СЛАБОМ ФЕРРОМАГНЕТИКЕ $\text{FeVO}_3$ В СВЕРХСИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДО 800 Тл

*В.В.Дружинин, А.И.Павловский, Р.В.Писарев,  
О.М.Таценко, В.В.Платонов*

Исследование эффекта Фарадея (ЭФ) в поле до 800 Тл показало отсутствие насыщения поворота плоскости поляризации от поля. Предполагается, что это явление может быть связано с ростом обменных взаимодействий в магнитном поле, а также с влиянием поля на электронные переходы в ионах  $\text{Fe}^{3+}$ .

Кристалл  $\text{FeVO}_3$  является слабым ферромагнетиком ( $T_N = 348$  К) с анизотропией типа "легкая плоскость", и его физические свойства были недавно рассмотрены в обзоре <sup>1</sup>. В отсутствие магнитного поля ферромагнитный  $m$  и антиферромагнитный  $l$  векторы расположены в плоскости, перпендикулярной оптической оси кристалла  $\bar{3}$ , при  $T = 0$  К слабый магнитный момент  $m_{\perp} = 1,3 \cdot 10^3$  А/м <sup>2-4</sup>. В работе <sup>5</sup> исследовался ЭФ при наклонном к оси  $\bar{3}$  распространении света, что дало при экстраполяции на базисную плоскость величину удельного вращения  $|\alpha_{\perp}| = (20 \div 2,2) \cdot 10^6$  град/м в оптической области. Нами исследован ЭФ при распространении света вдоль оптической оси  $B \parallel \bar{3}$  ( $T = 300$  К) на длине волны  $\lambda = 0,6328$  мкм в импульсных полях до 800 Тл <sup>6</sup>. Использовались плоскопараллельные зеленые кристаллы толщиной 100, 176 и 275 мкм. Знак ЭФ в исследуемых кристаллах и величина поля определялись по ЭФ в эталонном образце (стекло ТФ-5) с коэффициентом Верде  $V = 8,76$  град/см · Тл. На рис. 1 показаны осциллограммы одного из трех опытов, а на рис. 2 приведены зависимости удельного вращения для трех образцов и интенсивности проходящего света от поля (верхняя вставка). Поворот плоскости поляризации отрицателен.

Обсудим причину изменения интенсивности проходящего через кристалл света при увеличении поля. Длина волны  $\lambda = 0,6328$  мкм приходится на низкочастотный край полосы поглощения, отвечающей переходу  ${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_2$  в ионах трехвалентного железа. Увеличение интенсивности проходящего света говорит о том, что под действием поля полоса поглощения смещается в высокочастотную сторону. Сдвиг определяется разностью  $g$ -факторов основного и возбужденного состояний. В основном состоянии  $g = 2,00$  и сдвиг в поле этого состояния составляет  $\Delta\omega \cong 800$  см<sup>-1</sup> в поле 800 Тл. Даже учет сдвига основного состояния дает правильное по порядку величины значение сдвига, необходимое для объяснения наблюдаемого просветления кристалла.

Удельное фарадеевское вращение  $\alpha$  можно представить в виде

$$\alpha = \alpha_{\text{ф}} + \alpha_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\Phi i} = F_{ij} m_j$  – ферромагнитный вклад,  $m_{\perp}$  и  $m_{\parallel}$  – намагниченности в базисной плоскости и перпендикулярно к ней,  $F_{ij}$  – магнитооптический тензор,  $\alpha_{\text{д}} = V_{\text{д}} B$  – диамагнитный положительный вклад,  $V_{\text{д}}$  – коэффициент Верде. По данным <sup>5</sup> при 77 К и  $\lambda = 0,6328$  мкм  $|\alpha_{\perp}| = (7,7 \div 2,2) \cdot 10^6$  град/м. Учитывая, что  $m_{\perp} = 1,3 \cdot 10^3$  А/м, получаем  $|F_{\perp}| = (5,9 \div 1,7) \cdot 10^3$  град/А. По нашим данным в поле  $B = 100$  Тл  $\alpha_{\parallel} = -3,7 \cdot 10^5$  град/м. Расчетное значение момента  $m_{\parallel} = 13 \cdot 10^3$  А/м, что дает  $F_{\parallel} = -28,5$  град/А, т.е.  $F_{\perp}/F_{\parallel} \cong 10^2$ . Таким образом, в  $\text{FeVO}_3$  имеет место сильная анизотропия ЭФ, что, по-видимому, объясняет отсутствие наблюдений ЭФ в полях до 1 Тл.

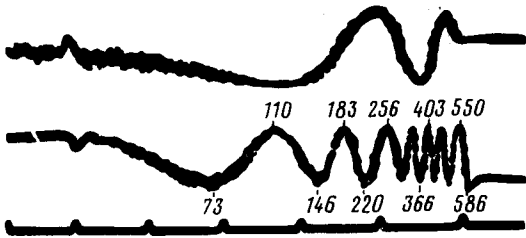


Рис. 1. Осциллограммы изменения под действием поля интенсивности света, проходящего через систему поляризатор – образец – анализатор. Верхняя осциллограмма – образец  $\text{FeVO}_3$  ( $l = 0,275$  мм); нижняя осциллограмма – эталонный образец из стекла ТФ-5 ( $l = 2,8$  мм). Числа указывают величину магнитного поля в Тл

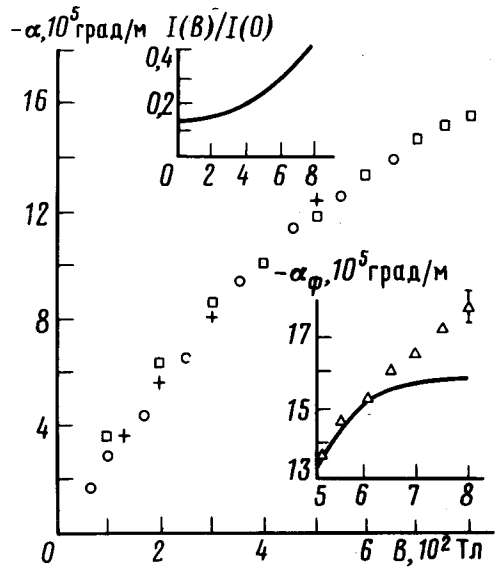


Рис. 2. Полевая зависимость удельного эффекта Фарадея в трех образцах  $\text{FeVO}_3$ : ● –  $l = 0,100$  мм; ■ –  $l = 0,176$  мм; + –  $l = 0,275$  мм. Точность определения угла поворота  $\pm 10^\circ$ . На верхней вставке – изменение под действием поля интенсивности света, проходящего через образец. Сплошная линия на нижней вставке – расчетная зависимость для магнитного момента  $m_{\parallel}$

Другой особенностью ЭФ является отсутствие насыщения зависимости  $\alpha_{\parallel}(B)$  вплоть до полей  $B = 800$  Тл. Эта особенность усиливается, если выделить  $\alpha_{\Phi, \parallel}$  из наблюдаемого вращения путем учета типичного значения  $V_{\text{д}} = 8 \div 3$  град/см · Тл [  $(0,05 \div 0,02)$  мин/см · Гс ] для диамагнетиков. В поле 800 Тл диамагнитный вклад достигает значений  $\alpha_{\text{д}} \cong (6 \div 3) \cdot 10^5$  град/м, и им уже нельзя пренебрегать. На рис. 2 на нижней вставке приведена зависимость  $\alpha_{\Phi, \parallel}(B)$  (при  $V_{\text{д}} = 3,3$  град/см · Тл) и расчетное значение  $m_{\parallel}(B)$ , достигающее насыщения в полях  $B \cong 600$  Тл (сплошная линия). Максимальное молекулярное поле в  $\text{FeVO}_3$   $B_{\text{обм}} = 300$  Тл <sup>7</sup>, а поле схлопывания подрешеток  $B_{\text{схл}} \cong 2B_{\text{обм}}$ .

Обсудим причины полевой зависимости  $\alpha_{\Phi, \parallel}(B)$ . Оценка линейного по полю отрицательно парамагнитного вклада  $\alpha_{\text{п}} \sim -M^2 B$  <sup>8</sup>, который дает в принципе рост отрицательного вклада в  $\alpha_{\Phi}$  и выше насыщения  $m_{\parallel}$ , оказалась на порядок ниже наблюдаемой величины. Рассмотренное выше смещение полосы поглощения  ${}^4T_2$  в сторону коротких волн не влияет на изменение  $\alpha(B)$ , так как эта полоса не дает вклада в дисперсию фарадеевского вращения <sup>5</sup>. Основной вклад в него дает сильная линия  ${}^6A_1 \rightarrow {}^4E$ ,  ${}^4A_1$  с центром в области  $\lambda_0 \cong 470$  мкм или предположительно двухэкситонное возбуждение  $({}^6A_1 + {}^6A_1) \rightarrow ({}^4T_1 + {}^4T_2)$  при  $\lambda_0 = 410$  нм. Возможны две причины, объясняющие заметное влияние поля на  $\alpha_{\Phi}$  выше точки схлопывания подрешеток. Первая из них состоит в сильном сдвиге линии  $\lambda_0$  под действием поля. Поскольку дисперсионная зависимость ферромагнитного вклада имеет вид

$$\alpha_{\Phi} \sim -m \lambda_0^2 / (\lambda^2 - \lambda_0^2), \quad (2)$$

то для объяснения роста  $\alpha_{\text{Ф}}$  на 15% по сравнению со значением в поле  $\approx 600$  Тл, требуется сдвиг  $\lambda_0$  в красную область на величину  $\Delta\lambda \approx 0,02$  мкм ( $\Delta\omega \approx -1200$  см $^{-1}$ ). Это довольно большая величина, которую (и особенно знак сдвига) нельзя получить, рассматривая переход  ${}^6A_1 \rightarrow {}^4E, {}^4A_1$ . Неизвестная природа перехода при 410 мкм в какой-то степени оставляя возможным этот механизм.

Отсутствие насыщения фарадеевского вращения в поле  $\approx 800$  Тл может быть связано с магнитоупругим взаимодействием, которое проявляется в росте обменного взаимодействия. На этот механизм указывает большая величина изменения  $T_N$  в FeVO $_3$  под действием внешнего давления  $dT_N/dp = 0,53$  К/кбар $^9$ , с одной стороны, и сдвиг максимума восприимчивости  $\chi_1$  в сторону высоких температур  $dT_N/dB \approx 10$  К/Тл (в полях до 0,03 Тл) $^{10}$ . Магнитострикция FeVO $_3$  при  $B \parallel \bar{3}$  не измерялась (при  $B \perp \bar{3}$  в полях до 1 Тл магнитострикция имеет величину  $\tilde{\lambda} \approx 10^{-6}$  $^{11}$ ). При возрастании  $B$  уменьшение расстояний вызывает эффект, аналогичный приложенному давлению. Считая  $dR/dp$  для FeVO $_3$  величиной такого же порядка, как и в рубине,  $-2 \cdot 10^{-14}$  м/кбар $^{11}$ , и предполагая, что магнитострикция при  $B \approx 100$  Тл достигнет значений  $\tilde{\lambda} \approx 10^{-3}$ , находим  $\Delta R \approx \tilde{\lambda} R \approx -5 \cdot 10^{-13}$  м, т.е.  $dB/dR \approx -0,2 \cdot 10^{15}$  Тл/м. Если это так, то в больших полях

$$\frac{dT_N}{dB} \approx \frac{dT_N}{dp} \frac{dp}{dR} \frac{dR}{dB} \approx 10^{-1} \text{ К/Тл}$$

Это дает рост молекулярного поля до величин  $H_{\text{обм}} \approx 350 \div 400$  Тл, что может также объяснить отсутствие насыщения  $\alpha(B)$ .

Авторы благодарят Г.Т.Андрееву за приготовление образцов.

#### Литература

1. Diehl D., Jantz W., Noläng J., Wettling W. Current Topics in Mater. Sci., 1984, 1, № 11, Pt III.
2. Петров М.П., Смоленский Г.А., Паугурт А.П., Кижяев С.А. ФТТ, 1972, 14, 109.
3. Кадошцева А.А., Левитин Р.З., Попов Ю.Ф., Селезнев В.Н., Усков В.В. ФТТ, 1972, 14, 214.
4. Великов Л.В., Прохоров А.С., Рудашевский Е.Г., Селезнев В.Н. ЖЭТФ, 1974, 66, 1847.
5. Kurtzig A.J., Wolf R., Le Craw R.C., Nielsen J.W. Appl. Phys. Lett., 1969, 14, 350.
6. Павловский А.И., Колокольчиков Н.П., Долотенко М.И., Быков А.И. ПТЭ, 1975, № 5, 195.
7. Eibschütz M., Lines M.E. Phys. Rev. B., 1973, 7, 4907.
8. Дружинин В.В., Таценко О.М. Оптика и спектроскопия, 1974, 36, 733.
9. Wilson D.M. M. Phys. Rev. B., 1976, 14, 1977.
10. Дорошев В.Д., Иванов С.Ф., Клошан В.А., Ковтун Н.М., Руденко В.В., Селезнев В.Н., Сирюк В.М. ФТТ, 1977, 19, 1522.
11. Dricamer H.G. Solid State Phys., New-Jork, 1966, 19, 135.