

ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ НА ПЛЕНКАХ EuO В МЕГАГАУССНЫХ ПОЛЯХ

*В.В.Дружинин, А.И.Павловский, А.А.Самохвалов,
О.М.Таценко*

Измерения эффекта Фарадея (ЭФ) в импульсных магнитных полях на пленках EuO с кислородными вакансиями выявили две особенности: резкое увеличение ЭФ в полях $\sim 0,45 \text{ Мэ}$ и возрастание удельного вращения до величины $3,7 \cdot 10^7 \text{ град/см}$ в полях $\sim 0,8 \text{ Мэ}$. Проведено обсуждение результатов.

ЭФ был измерен на пленках EuO толщиной $l = 1500 \pm 50 \text{ \AA}$, содержащих 4% кислородных вакансий, с энергией активации $0,12 \text{ эв}$ и температурой Кюри $T_c = 148 \text{ К}$ в магнитных полях до $1,5 \text{ Мэ}$, создаваемых в магнитокумулятивном генераторе. Методика измерения ЭФ описана в предыдущих работах [1, 2] и заключалась в следующем. Луч гелий-неонового лазера $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ проходил последовательно через образец тяжелого флинта ТФ-5 с постоянной Верде $V = 0,046 \text{ мин/см} \cdot \text{э}$ и пленку EuO на стеклянной подложке ($l = 1,27 \text{ мм}$, $V = 0,01 - 0,02 \text{ мин/см} \cdot \text{э}$).

Плоскость анализатора была повернута на угол 45° по отношению к первоначальной поляризации, что позволяет определить знак ЭФ. В случае положительного эффекта кривая изменения интенсивности света идет на максимум (наибольшее отклонение вниз от нулевой линии), угол поворота до первого максимума составляет 45° . Каждый последующий пичок на осциллограмме соответствует повороту на 180° .

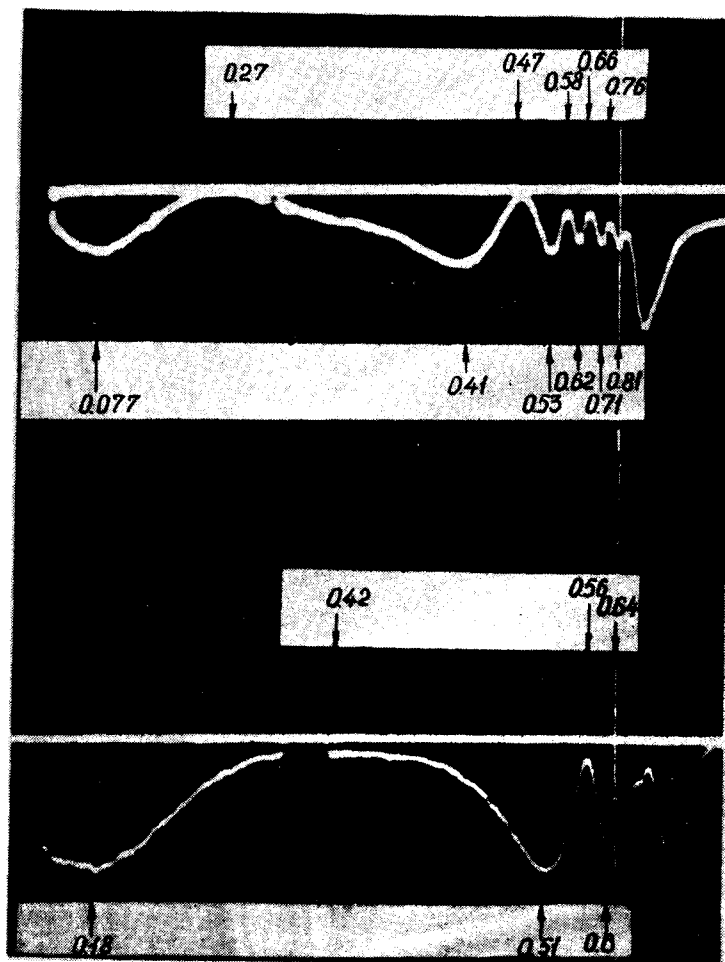


Рис. 1. Осциллограммы ЭФ на составных образцах ТлФ-5 + ЕuO. Вверху первый опыт с ТлФ-5 ($l = 6$ мм), внизу — второй с ТлФ-5 ($l = 3$ мм). Стрелками указаны поля в Мэ, вертикальная линия означает конец регистрации ЭФ. $T = 293$ К

На рис. 1 приведены осциллограммы двух опытов с одной и той же пленкой ЕuO, но разной длиной флинта. В первом опыте измерения проведены до $H \sim 0,8$ Мэ, что дало суммарный угол $\theta = 945^\circ$. Хотя поле достигало величины $1,5$ Мэ, разрешение аппаратуры и попадание на ФЭУ постороннего света (большой максимум в конце осциллограммы) не позволили провести измерения до этой величины. В другом опыте поле $\sim 0,64$ Мэ, а суммарный угол равен 470 град. Вычитая

вклады флинта и подложки, получаем угол поворота от пленки EuO 550 и 310° , что соответствует удельному вращению $\alpha = 3,66 \cdot 10^7 \text{ град/см}$ и $\alpha = 2,06 \cdot 10^7 \text{ град/см}$. Эта величина превышает опубликованные данные для α на порядок величины. Так в работе [3] на пленке EuS была измерена величина $\alpha = 2 \cdot 10^6 \text{ град/см}$. ЭФ для исследуемых пленок EuO при 20K , $H = 200 \text{ э}$ и $\lambda = 6328\text{Å}$ характеризуется $\alpha = 1,85 \cdot 10^5 \text{ град/см}$. Из осциллограммы рис. 1 видно, что амплитуда пиков с ростом поля уменьшается. Это указывает на возникновение эллиптичности, обусловленной дихроизмом. Увеличение же эллиптичности с ростом поля, что на осциллограмме наблюдается по возрастанию отклонения минимума от нулевой линии, вызвано красным сдвигом линии поглощения, ранее наблюдавшимся в [4]. На рис. 2 приведена зависимость $\theta = f(H)$. Видно, что в области полей $0,45 - 0,5 \text{ Мэ}$ происходит резкое возрастание θ . Был также произведен опыт на другой пленке EuO ($l = 1900\text{Å}$) с кислородными вакансиями (энергия активации $0,08 \text{ эв}$) без флинта в поле, достигающем $0,9 \text{ Мэ}$. Общий угол θ составил 270° , что дает $\alpha = 1,4 \cdot 10^7 \text{ град/см}$.

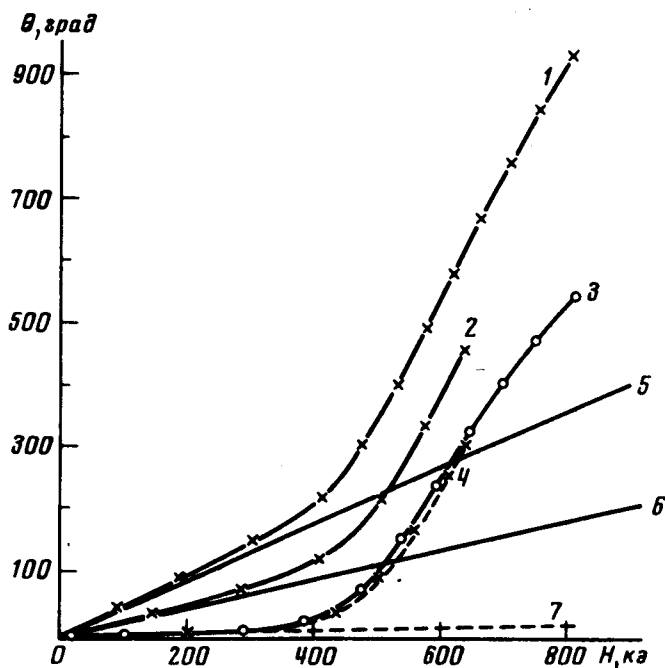


Рис. 2. Зависимость угла поворота плоскости поляризации от поля для обоих суммарных образцов в первом (1) и втором (2) опытах, отдельно для образцов ТФ-5 (5 и 6), пленки EuO (3 и 4) и стеклянной подложки с $V = 0,01 \text{ мин/см} \cdot \text{э}$ (7)

Интерпретация резкого увеличения θ связана с образованием огромных ферромагнитных молекул-ферронов [5] вокруг кислородных вакансий. Край полосы поглощения обусловлен возбужденными состояниями, образованными переносом электрона из Eu^{2+} на оболочку $5d$ соседнего иона Eu^{2+} (магнитный экситон) [6]. За счет сильного внутриатом-

ного $d - f$ -обменного взаимодействия край полосы поглощения сдвигается на величину $\Delta\omega = -2I_{d-f}\bar{J}\sigma = -I_{d-f}\bar{J}$, где \bar{J} – среднее значение момента основного состояния Eu^{2+} . Используя уравнение молекулярного поля $\bar{J} = JB_f(x)$ при $T_c = 148\text{K}$, получаем в поле $0,5 \text{ Мэ}$ $\bar{J} = 1,77$. Взяв $I_{d-f} = 540 \text{ см}^{-1}$ [6, 7] получим, что $\Delta\omega \approx 0,12 \text{ эв}$, что равно энергии активации доноров. Увеличение концентрации электронов проводимости приводит к росту обменного интеграла через электроны проводимости между Eu^{2+} , окружающими вакансиями. В результате образуются ферроны со средним значением J на ион равным $\sim 3,5$. Образование ферронов фиксируется в различных работах [6, 8], в том числе и в антиферромагнитном EuTe по ЭФ [9]. Считая, что в ферроне содержится по 12 ионов Eu^{2+} [6], \bar{J} в поле $0,5 \text{ Мэ}$ скачкообразно достигает 2,6. Таким образом, резкое увеличение θ в поле $0,45 - 0,5 \text{ Мэ}$ указывает на переход полупроводник – металл под действием внешнего поля, что ранее не наблюдалось.

Удельное вращение в области линии поглощения описывается следующей формулой [1, 10].

$$\alpha = \frac{\omega_p^2 \omega^2}{4\pi c} \sum_{a,b} \beta_a \left\{ \frac{(f_+ - f_-)[p^2(p - 2\Gamma^2) - k^2(p + 2\Gamma^2) + 8\Gamma^2\omega^2 p]}{\omega_{ba}[(p^2 - k^2)^2 + 16\Gamma^2\omega^2 p^2]} + \frac{2(f_+ + f_-)\omega_H(p^2 - k^2 - \Gamma^2 p)}{(p^2 - k^2)^2 + 16\Gamma^2\omega^2 p^2} \right\} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2, \quad (1)$$

где $\omega_p^2 = 4\pi Nc^2/m$, Γ – полуширина линии поглощения на половине амплитуды, f_{\pm} – сила осциллятора для право- и левополяризованного света, β_a – вероятность заселения уровня a , $p = \omega_{ab}^2 + \omega_H^2 + \Gamma^2 - \omega^2$, $k^2 = 4(\Gamma^2\omega^2 + \omega_{ba}^2\omega_H^2)$, $\omega_H = g\mu_B/\hbar$.

Первое слагаемое в фигурной скобке (1) – парамагнитный вклад, второе – диамагнитный. Максимальная величина первого вклада при $\omega = \omega_{ba} - \Gamma$ оценивается по формуле [10]

$$\alpha = \frac{\omega_p^2 f_o}{16\pi c \Gamma} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2, \text{ рад/см} \quad (2)$$

При $N = 1,7 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, экспериментальных величинах $f_o = 0,1$ и $n = 2,3$ [10], а также при $\Gamma = 0,1 \text{ эв}$; $\alpha = 1,2 \cdot 10^7 \text{ град/см}$, что совпадает по порядку величины с нашими измерениями. Отметим, что теоретический предел α по (2) равен 10^8 град/см при $f_o = 1$. Значение Γ при $T = 8\text{K}$ равно $0,9 \text{ эв}$, а при 300K – $0,4 \text{ эв}$ [11]. По-видимому, внеш-

нее сверхсильное поле сужает линию перехода до $0,1 \text{ эв}$, на что указывает зависимость коэффициента поглощения от поля, измеренная нами в третьем опыте. Если это так, то при $\omega_{ba} = \omega_{ba}^0 - l_d - f \bar{J}$, и $\omega_{ba}^0 = 3,36 \cdot 10^{15} \text{ сек}^{-1}$ (по нашим измерениям), в поле $H = 0,8 \text{ Мэ}$ разность $\omega_{ba} - \omega \approx 0,1 \text{ эв}$, что позволяет пользоваться (2). Сужение линии позволяет также объяснить меньшие значения α при низких температурах и в сравнительно слабых магнитных полях. По проведенным оценкам диамагнитный член в (1) также дает вклад, которым нельзя пренебрегать.

Авторы благодарят Э.Л.Нагаева и Р.В.Писарева за обсуждение результатов и Н.Н.Лошкареву за приготовление образцов и измерение их параметров.

Московский
инженерно-физический институт

Поступила в редакцию
24 января 1976 г.

Литература

- [1] В.В.Дружинин, О.М.Таценко. Оптика и спектроскопия, **26**, 733, 1974.
- [2] А.И.Павловский, В.В.Дружинин, О.М.Таценко, Р.В.Писарев. Письма в ЖЭТФ, **20**, 561, 1974.
- [3] K.N.Tu, K.J.Ahn, J.C.Suits. IEEE, M.8, №3, 651, 1972.
- [4] G.Bush, P.Wachter. Phys. Kondens. Mater., **5**, 232, 1966.
- [5] Э.Л.Нагаев. Тр. Междунар. конферен. по магнетизму, МГМ-73, **4**, 447, М., изд. Наука, 1974.
- [6] T.Kasuya, A.Janase. Rev. Mod. Phys., **40**(3), 684, 1968.
- [7] В.Е.Argyle, J.C.Suits, M.J.Freiser. Phys. Rev. Lett., **15**, 822, 1965.
- [8] А.А.Самохвалов, Т.И.Арбузова, Я.А.Афанасьев, Б.А.Гижевский, Н.Н.Лошкарева, М.И.Симонова, Н.И.Солин. Тр. Междун. конфер. по магнетизму, МГМ-73, **5**, 148, М., изд. Наука, 1974.
- [9] J.Vitins, P.Wachter. Тр. Междунар. конфер. по магнетизму, МГМ-73, **1**(2), 150, М., изд. Наука, 1974.
- [10] J.C.Suits. IEEE, M. 8, №1, 95, 1972.
- [11] З.Метфессель, Д.Маттис. Магнитные полупроводники, М., изд. Мир, 1972, стр. 161.