

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.632

ВЛИЯНИЕ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОГО РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА
НА ОПТИЧЕСКИЕ И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ГРАНУЛИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

А. Б. Грановский, М. В. Кузьмичев, А. Н. Юрасов

(кафедра магнетизма)

Показано, что квазиклассический размерный эффект оказывает значительное влияние на оптические и магнитооптические спектры ферромагнитных гранулированных сплавов. В частности, при уменьшении размера гранул возможно изменение амплитуды, профиля и знака экваториального эффекта Керра.

Магнитные гранулированные сплавы представляют собой неоднородные магнетики, содержащие ферромагнитные металлические гранулы, размеры которых близки к размеру домена; при этом гранулы хаотически расположены в пара- или диамагнитной матрице металла или диэлектрика. В этих системах обнаружены гигантское магнетосопротивление, гигантский аномальный эффект Холла (АЭХ) и большая магнитооптическая активность, что представляет значительный практический интерес.

Для описания свойств таких сплавов используются методы эффективной среды: Максвелла–Гарнетта [1], Бруггемана [1–3] и симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта [4, 5]. Первый метод применим лишь при малой концентрации одной из компонент сплава [1], второй описывает неоднородные сплавы в достаточно широком диапазоне концентраций, если две компоненты сплава топологически эквивалентны [1]. Симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта наиболее адекватно для гранулированных сплавов металл–диэлектрик, так как является обобщением приближения Максвелла–Гарнетта на область произвольных концентраций и корректно описывает перколяционный переход [4, 5].

Теория оптических и магнитооптических спектров ферромагнитных гранулированных сплавов была развита в работах [1] и [2] в предположении, что тензор диэлектрической проницаемости (ТДП) ферромагнитных гранул и матрицы тождествен ТДП соответствующих объемных материалов. При этом, очевидно, не учитывалось, что рассеяние на поверхностях гранул, приводящее к квазиклассическому размерному эффекту (РЭ), модифицирует как диагональные $\epsilon_{xx} = \epsilon$, так и недиагональные $\epsilon_{xy} = \gamma$ компоненты ТДП гранул, если их средний размер (радиус r_0) сравним с длиной свободного пробега электрона l . В настоящей работе показано, что квазиклассический РЭ может оказывать существенное влияние как на оптические, так и на магнитооптические спектры ферромагнитных гранулированных сплавов в видимой и ИК-области спектра.

Расчеты спектров проводились в симметризованном приближении Максвелла–Гарнетта [4, 5] и

приближении Бруггемана [1] для гранулированного сплава $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ с объемной концентрацией Co $f = 0,45\text{--}0,49$, соответствующей порогу перколяции. Выбор сплава определяется тем, что все оптические и магнитооптические параметры, а также его микроструктура хорошо известны [1, 4].

Учет квазиклассического РЭ в выражениях для диагональных $\epsilon_{xx} = \epsilon$ и недиагональных $\epsilon_{xy} = \gamma$ компонент ТДП сводится к следующему. Время свободного пробега электронов в грануле (τ_{part}) меньше, чем в массивном образце (τ_{bulk}), за счет соударений с поверхностью гранул [1]:

$$1/\tau_{\text{part}} = 1/\tau_{\text{bulk}} + v_f/r_0, \quad (1)$$

где v_f — скорость Ферми. В этом выражении опущен параметр отражения от поверхности гранул Фукса–Зондхаймера, который полагается равным единице (зеркальное отражение). Тогда, принимая во внимание, что частотная зависимость внутризонной проводимости описывается законом Друде–Лоренца, можно, как и в работе [1], записать:

$$\epsilon_{\text{Co,gr}} = \epsilon_{\text{Co}} + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})}, \quad (2)$$

где ω — частота света, ω_p — плазменная частота [1], причем последние два члена описывают отличия диагональных компонент ТДП для гранул Co ($\epsilon_{\text{Co,gr}}$) и массивного образца Co (ϵ_{Co}).

Зависимость недиагональных компонент ТДП γ от размера частиц сложнее. Поскольку $\gamma \sim \sigma_{xy}(\omega)$, то аналогично (2), с учетом друде-лоренцевского типа частотной зависимости $\sigma_{xy}(\omega)$ [6] можно записать:

$$\gamma_{\text{Co,gr}} = \gamma_{\text{Co}} + 4\pi \left[\frac{\sigma_{xy}(0)}{\tau_{\text{bulk}}^2 \omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})^2} - \frac{\sigma_{xy}(0)}{\tau_{\text{part}}^2 \omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})^2} \right], \quad (3)$$

где $\sigma_{xy}(0) = 4\pi M_s R_{\text{gr}}/\rho_{\text{gr}}^2$; M_s — намагниченность насыщения; ρ_{gr} — удельное сопротивление; R_{gr} —

коэффициент аномального эффекта Холла. Квазиклассический РЭ оказывает влияние как на R_{gr} , так и на ρ_{gr} . Последнее достаточно очевидно и в силу выражения (1) $\rho_{gr} = \rho_{bulk}(1 + l/r_0)$. Влияние РЭ на коэффициент АЭХ гранул, согласно работе [7], в случае $l/r_0 \geq 1$ можно записать в виде

$$R_{gr} = R_{bulk} + 0,2R_s \frac{l}{r_0} \left(1 + \frac{l}{r_0}\right),$$

где R_s — значение коэффициента АЭХ материала поверхности гранул. Подчеркнем, что намагниченности гранул и объемного сплава могут существенно различаться за счет поверхностных эффектов, но этими изменениями мы пренебрегаем по сравнению со значительными эффектами, состоящими в отличии ρ_{bulk} , R_{bulk} и τ_{bulk} от ρ_{gr} , R_{gr} и τ_{gr} .

Результаты выполненного в приближении Бруггемана расчета действительной и мнимой частей ϵ для сплава $Co-Al_2O_3$ с концентрацией Co $f = 0,45$ (рис. 1) показывают, что в ближней ИК-области спектра размер гранул оказывает значительное влияние на спектры диагональной компоненты эффективного ТДП, а следовательно, и на оптические спектры. Чем меньше размер частиц, тем сильнее это влияние. Этот эффект проявляется только при немалых концентрациях гранул. Именно поэтому в работе [1] не обнаружено влияния размеров частиц на рассчитанные в приближении Максвелла–Гарнетта оптические спектры гранулированных сплавов при $f \leq 0,2$. Следует также подчеркнуть, что чем меньше вклад межзонных переходов в оптическую проводимость, тем больше роль РЭ.

Спектры экваториального эффекта Керра (ЭЭК) $\delta(\omega)$, рассчитанные для того же сплава, представлены на рис. 2. Параметр $\delta(\omega)$ определяется значениями γ и ϵ [5]. Как видно из рис. 2, РЭ оказывает очень сильное влияние на магнитооптические спектры в ближней ИК-области, изменяя их амплитуду, профиль и даже знак. Столь сильное влияние связано с тем, что $\delta(\omega)$ линейно зависит от γ , нелинейно от ϵ [5] и в обеих этих функциях — как

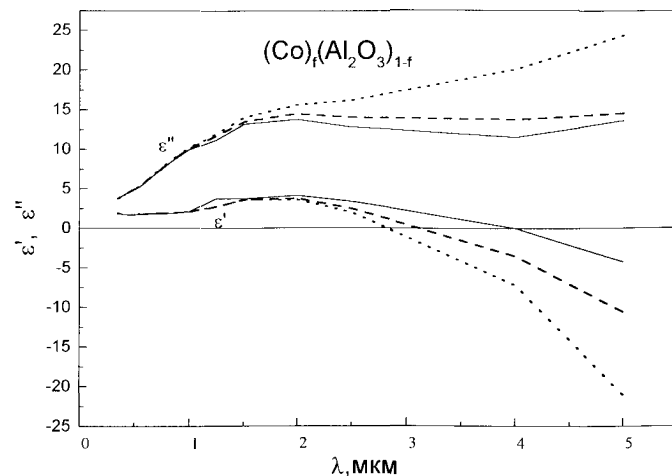


Рис. 1. Энергетическая зависимость действительной и мнимой частей диагональной компоненты ТДП в приближении Бруггемана ($f = 0,45$; формфактор частиц $L = 0,31$): без учета размерного эффекта (точечная кривая), $r_0 = 7$ нм (штриховая) и 4 нм (сплошная)

в действительной, так и в мнимой частях — проявляется РЭ. Если не учитывать влияние РЭ на АЭХ, то изменения магнитооптических спектров за счет влияния РЭ на γ и ϵ будут одного порядка (см. рис. 2) и, как видно, приводят к увеличению ЭЭК. Дополнительный учет РЭ в АЭХ может как усилить, так и ослабить ЭЭК, что определяется знаком и величиной отношения R_s/R_{bulk} , т. е. структурой поверхностного слоя гранул. Согласно экспериментальным данным по гигантскому АЭХ [7], это отношение может достигать $10^3 \div 10^4$, что должно приводить к гигантскому изменению ЭЭК в ИК-области спектра.

Сравнение рассчитанных в симметризованном приближении Максвелла–Гарнетта магнитооптических спектров ($f = 0,49$) с экспериментальными

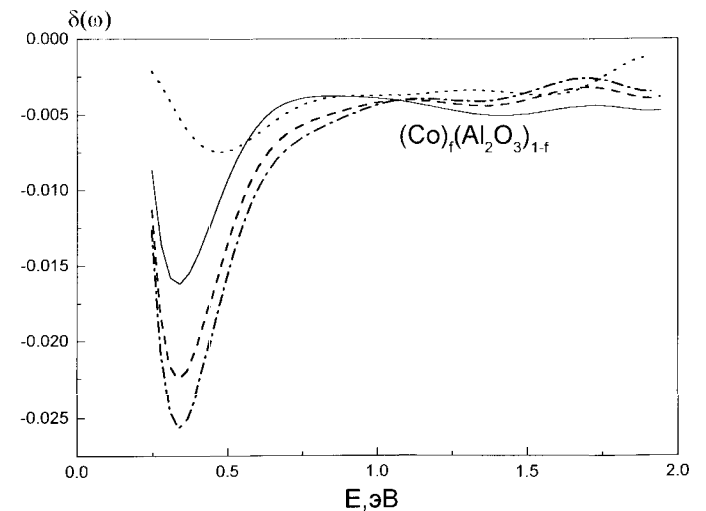


Рис. 2. Магнитооптические спектры экваториального эффекта Керра, рассчитанные в приближении Бруггемана ($f = 0,45$; $L = 0,31$; $l = 2$ нм; $r_0 = 4$ нм; $R_s/R_{bulk} = -20$): без учета размерного эффекта (точечная кривая), с учетом размерного эффекта для ϵ согласно (2) при $\gamma_{Co,gr} = \gamma_{Co}$ (штриховая), с учетом размерного эффекта для ϵ и γ при $R_{gr} = R_{bulk}$ (штрих-пунктирная линия) и с учетом полного размерного эффекта (сплошная)

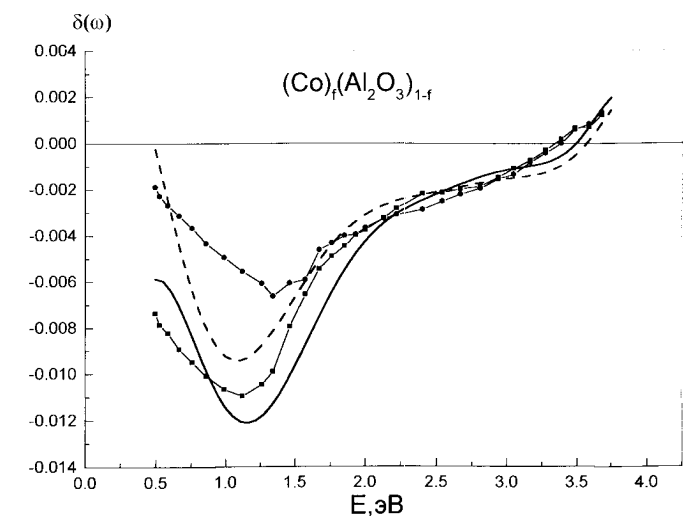


Рис. 3. Магнитооптические спектры экваториального эффекта Керра: теоретические ($L_3 = 0,33$; $l = 1,8$ нм; $R_s/R_{bulk} = -3,75$) при $f = 0,49$; $L_1 = 0,65$; $r_0 = 2,2$ нм (штриховая кривая), $f = 0,48$; $L_1 = 0,6$; $r_0 = 2,3$ нм (сплошная) и экспериментальные при $f = 0,49$ (кружки) и $f = 0,52$ (квадраты)

(рис. 3) показывает, что учет полного квазиклассического РЭ приводит к хорошему согласию с экспериментом.

Литература

1. Niklasson G.A., Granqvist C.G. // J. Appl. Phys. 1984. **55**, No. 9. P. 3382.
2. Khan H.R., Granovsky A., Brouers F. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 1997. **183**. P. 127.
3. Ganshina E., Granovsky A., Gushin V. et al. // Physica A. 1997. **241**. P. 45.

4. Ganshina E., Kumaritova R., Bogoroditsky A. et al. // J. Magn. Soc. Japan. 1999. **23**. P. 379.
5. Granovsky A., Kuzmichov M., Clerc J.P. // J. Magn. Soc. Japan. 1999. **23**. P. 382.
6. Ведяев А.В., Грановский А.Б., Котельникова О.А. Кинетические явления в неупорядоченных сплавах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992.
7. Brouers F., Granovsky A., Sarychev A., Kalitsov A. // Physica A. 1997. **241**. P. 284.

Поступила в редакцию
29.03.00

УДК 677.463.5

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ПУАССОНА В ОДНООСНЫХ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

И. В. Платонова, О. В. Сидоров^{*)}

(кафедра общей физики для естественных факультетов)

Измерены коэффициенты Пуассона анизотропных волокон с малым поперечным сечением. Определено влияние термообработки на структуру этих волокон и на значения коэффициентов Пуассона.

Одноосные системы, такие, как высокопрочные, высокомодульные и высокоориентированные волокна (ВВ) на основе полимеров с различной жесткостью цепи [1], обладают, как правило, цилиндрической анизотропией и являются в общем случае ортотропными.

Определение значений коэффициентов Пуассона (КП) важно с точки зрения как прикладных, так и фундаментальных исследований, поскольку КП структурно-чувствительны [2]. Так, например, с повышением пористости КП уменьшается, а с увеличением температуры растет, если при этом не происходит фазового перехода [3]. Модули упругости и КП определяют экспериментально [4–7] или путем моделирования на основе методов молекулярной динамики [8]. Моделирование позволяет получить либо предельные значения механических характеристик для данного вещества, либо значения для идеальной структуры кристалла или паракристалла.

Экспериментальным путем модули Юнга и КП для ВВ непосредственно измерить не удается, так как диаметр волокон составляет 10–20 мкм. Уверенно измеряется лишь продольный модуль растяжения, а продольный и поперечные модули сжатия и растяжения измеряются уже с трудом. КП при поперечном сжатии можно определить путем гидростатического сжатия [9, 10].

Для измерения КП был использован следующий метод. В общем случае ВВ — неоднородные ортотропные тела с цилиндрической анизотропией, но в первом приближении их можно считать однородными. В случае гидростатического сжатия с учетом высокой степени анизотропии ВВ для относительной

деформации ε_i можно записать [9]

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \frac{\nu_{\theta r} \sigma_\theta}{E_r} = \frac{p(1 - \nu_{\theta r})}{E_r}, \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{\nu_{r\theta} \sigma_r}{E_r} + \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} = \frac{p(1 - \nu_{r\theta})}{E_r}, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{rz} \sigma_r}{E_r} - \frac{\nu_{\theta z} \sigma_\theta}{E_\theta} = -\frac{p(\nu_{rz} + \nu_{\theta z})}{E_r}, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_i — модуль Юнга, ν_{ij} — КП, p — давление в жидкости, σ_i — механическое напряжение, $i, j = (r, \theta, z)$. (Используется цилиндрическая система координат.)

Из системы (1) находим изменение объема волокна $\Delta V/V$ в этом случае:

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{1}{E_r} p(2 - \nu_{r\theta} - \nu_{\theta r} - \nu_{rz} - \nu_{zr}), \quad (2)$$

а так как для трансверсально-изотропного волокна $\nu_{ij} = \nu_{ji}$, то формула (2) приобретает вид

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{2}{E_r} p(1 - \nu_{r\theta} - \nu_{rz}),$$

где ν_{rz} — КП при продольном растяжении, $\nu_{r\theta}$ — КП при поперечном сжатии.

КП ν_{rz} обычно находят из рентгенографических измерений [10]. Тогда, зная кривую сжимаемости волокна [11], можно найти $\nu_{r\theta}$ по известному поперечному модулю Юнга E_r и наоборот.

В качестве образцов были взяты свежесформованные и термообработанные по методике работы [1] блок-сополимерные ВВ на основе поли-*n*-фенилентерфаламида и полиамидбензимидазола. Специфика

^{*)} МГТУ им. А. Н. Косыгина.