

Гигантский магниторефрактивный эффект в магнитных гранулированных сплавах CoFe–MgF

© А. Грановский, В. Гуцин, И. Быков, А. Козлов, N. Kobayashi*, S. Ohnuma*, T. Masumoto*, M. Inoue**,***

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия

* The Research Institute for Electric and Magnetic Materials,
2-1-1, Yagiymaminami, Taihakuku, Sendai 982-0807, Japan

** Toyohashi University of Technology,
Toyohashi 441-8580, Japan

*** CREST, Japan Science & Technology Corporation,
Kawaguchi 332-0012, Japan

E-mail: granov@magn.ru

(Поступила в Редакцию 26 сентября 2002 г.)

В инфракрасной области спектра от 5 до 20 μm изучены дисперсионная и полевая зависимости магниторефрактивного эффекта в гранулированных системах металл–диэлектрик CoFe–MgF, обладающих для составов вблизи порога перколяции туннельным магнитосопротивлением 7.5% в поле 1700 Ое. Изменение коэффициента отражения p -поляризованного света при намагничивании в инфракрасной области спектра 5–7 μm составляет порядка 0.1%, а в области 10–12 μm достигает рекордных значений 1.2–1.5%, что на два порядка превышает традиционные нечетные и четные магнитооптические эффекты отражения в инфракрасном диапазоне длин волн. Магниторефрактивный эффект в магнитных системах с туннельной проводимостью является следствием спин-зависимого высокочастотного туннелирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-17797) и программы „Университеты России“.

Магниторефрактивный эффект (МРЭ) состоит в изменении коэффициентов отражения R , пропускания T и поглощения A света при приложении к образцу магнитного поля. В магнитных и немагнитных материалах, не обладающих большим магнитосопротивлением, МРЭ пренебрежимо мал. В магнитных материалах с гигантским, туннельным или колоссальным магнитосопротивлением проводимость значительно изменяется при намагничивании, поэтому диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega)$ в инфракрасной области спектра, линейно связанная с проводимостью $\sigma(\omega)$, также является функцией приложенного магнитного поля. Поскольку индексы рефракции и все оптические коэффициенты (R , T и A) определяются диэлектрической проницаемостью, очевидно, что МРЭ является частотным аналогом гигантского магнитосопротивления и четным по намагниченности. Следует отметить, что в инфракрасной области спектра традиционные нечетные и четные по намагниченности магнитооптические эффекты на отраженном свете в металлах и композитах не превышают 0.01%, поэтому поиск материалов с большим МРЭ имеет важное практическое значение.

Впервые МРЭ был теоретически изучен и экспериментально подтвержден для мультислоев Fe/Cr [1]. Теория МРЭ для металлических мультислоев была также развита в работах [2–4]. Хотя имеются и несоответствия в результатах этих работ (см., например, обсуждение в [4]) относительно частотной зависимости МРЭ и его величины, эффект уверенно наблюдается в ближней инфракрасной области спектра и при отражении состав-

ляет порядка 0.1–0.5% [1,4]. Теория МРЭ в гранулированных сплавах металл–металл была построена в работе [5] и недавно модифицирована в [6]. Экспериментально измеренные значения МРЭ для гранулированных систем Co–Ag [6,7] в достаточно сильных магнитных полях не превысили 1%. Наиболее простое соотношение для МРЭ металлических систем было получено в [5] для спектральной области Хагена–Рубенса ($\omega\tau \ll 1$, где τ — время релаксации электронов)

$$\xi = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{H=0} - R_{H_{\max}}}{R_{H=0}} = -\frac{1}{2}(1-R) \frac{\rho_{H=0} - \rho_{H_{\max}}}{\rho_{H=0}} = -\frac{1}{2}(1-R) \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (1)$$

где $\Delta\rho/\rho$ — магнитосопротивление. Из этого выражения следует, что высокие значения МРЭ должны наблюдаться в системах с большим магнитосопротивлением и малым коэффициентом отражения, т.е. не в металлических системах. Поэтому мы провели исследования МРЭ в гранулированных системах металл–диэлектрик Co–Al–O [8], Fe–SiO_n, CoFeZr–SiO_n [9] и показали, что наибольшее значение МРЭ на отражении (усиленное за счет интерференции до 0.8% [8]) наблюдалось для системы Co–Al–O. Недавно в [10] сообщалось также о МРЭ в системе Co–Al–O, однако не превышающем 0.35% и существующем только в узкой спектральной области в окрестности 9 μm .

В настоящей работе мы приводим экспериментальные данные для МРЭ в гранулированных сплавах CoFe–MgF с туннельным характером проводимости и большим

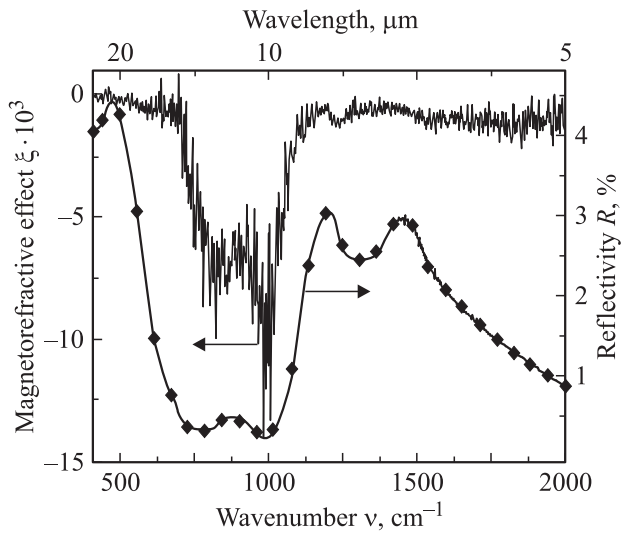


Рис. 1. Спектры МРЭ ξ в поле $H = 1700$ Ое и коэффициента отражения $R_{H=0}$ для пленки гранулированного сплава $(\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.6})_{48}-(\text{Mg}_{52}\text{F})$ при усреднении по 300 сканам.

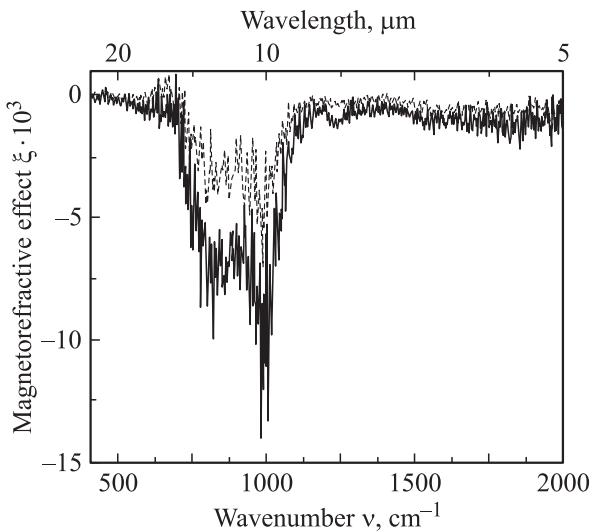


Рис. 2. Спектры частотной зависимости МРЭ для $H = 1700$ Ое с разрешением 2 cm^{-1} (сплошная кривая) и $H = 1400$ Ое с разрешением 4 cm^{-1} (штриховая кривая) для пленки $(\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.6})_{48}-(\text{Mg}_{52}\text{F})$.

магнитосопротивлением 13% при комнатной температуре в относительно слабом поле [11]. Изучение МРЭ в системах с туннельной проводимостью представляет особый интерес, так как в этом случае данный эффект является следствием спин-зависимого высокочастотного туннелирования. При низких частотах вероятность туннелирования не зависит от частоты. Однако при высоких частотах возможно как уменьшение туннельной прозрачности, когда период электромагнитной волны становится меньше характерного времени туннелирования, так и увеличение вероятности туннелирования за счет поглощения туннелирующим электроном кванта света.

Тонкопленочные образцы состава $(\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.6})_{48}-(\text{Mg}_{52}\text{F})$ вблизи порога перколяции были получены методом tandemного осаждения с использованием радиочастотного магнетронного распыления [11]. В качестве подложек использовалось стекло Corning 7059. Толщина пленок составляла $2 \mu\text{m}$, размер гранул CoFe был равен $2-3 \text{ nm}$. Детали изготовления, структурные и магнитные свойства, а также экспериментальные данные о магнитосопротивлении приведены в работах [11,12]. Для измерения коэффициента отражения и МРЭ использовался фурье-спектрометр FTIR PU9800 [8] с магнитооптической приставкой, позволяющей как размагничивать образец переменным полем, так и прикладывать постоянное поле в плоскости пленок. Измерения МРЭ выполнены при комнатной температуре для p -поляризованного света при углах падения света $8-10^\circ$ при спектральном разрешении 2 cm^{-1} в магнитном поле до 1700 Ое. На рис. 1 представлен спектр МРЭ для образца $(\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.6})_{48}-(\text{Mg}_{52}\text{F})$, полученный путем усреднения по 300 измерениям (сканам) в магнитном поле 1700 Ое. Магнитосопротивление образца в том же поле составляет 7.5%. В спектральной области $10-12 \mu\text{m}$, где коэффициент отражения R имеет минимальные (ниже 5%) значения (рис. 1), флуктуации МРЭ максимальны. На рис. 2 представлены спектры частотной зависимости МРЭ для двух значений магнитного поля. Наблюдаемое резкое увеличение эффекта при небольшом изменении поля от 1400 до 1700 Ое свидетельствует о нелинейной зависимости величины МРЭ от магнитного поля, что аналогично полевой зависимости магнитосопротивления.

Как следует из рис. 1, величина МРЭ в инфракрасной области $5-7$ и $15-20 \mu\text{m}$ составляет порядка 0.1%. Таким образом, МРЭ существует в широкой области спектра, включая ближний инфракрасный диапазон. Подчеркнем, что из простых оценок для характерного времени туннелирования t , которое при ширине туннельного барьера $a = 1 \text{ nm}$ и фермиевской скорости $v = 10^8 \text{ cm/s}$ составляет $t = a/v = 10^{-15} \text{ s}$, следует, что в ближней инфракрасной области спектра характерное время туннелирования и период электромагнитной волны — величины одного порядка.

В области частот $10-12 \mu\text{m}$ МРЭ достигает больших, а при отчетливо проявляющихся резонансах — гигантских значений: 1.5%, что на два порядка больше традиционных магнитооптических эффектов в инфракрасной области спектра. Более того, МРЭ в области резонансов превышает МРЭ во всех ранее исследованных металлических и неметаллических системах. Прежде всего это связано с уменьшением коэффициента отражения, что на качественном уровне описывается соотношением (1). С другой стороны, природа резонансного характера спектра МРЭ в окрестности $10 \mu\text{m}$ остается неясной.

Обнаруженный гигантский МРЭ открывает новые возможности как для изучения спин-зависимого высокочастотного туннелирования, так и для практического использования инфракрасной магнитооптики.

Список литературы

- [1] J.C. Jacquet, T. Valet. *Magnetic Ultrathin Films, Multilayers and Surfaces. MRS Symp. Proc.* **384**, 477 (1995).
- [2] Н.Ф. Кубраков, А.К. Звездин, К.А. Звездин, В.А. Котов. *ЖЭТФ* **114**, 3, 1101 (1998).
- [3] G.M. Genkin. *Phys. Lett. A* **241**, 4, 293 (1998).
- [4] S. Uran, M. Grimsditch, E. Fullerton, S.D. Bader. *Phys. Rev. B* **57**, 5, 2705 (1998).
- [5] А. Грановский, М. Кузмичев, Ж.П. Клерк. *ЖЭТФ* **116**, 5(11), 1762 (1999).
- [6] V.G. Kravets, D. Bozec, J.A.D. Matthew, S.M. Thompson, H. Menard, A.B. Horn, A.F. Kravets. *Phys. Rev. B* **65**, 5, 054415 (2002).
- [7] J.P. Camplin, S.M. Thompson, D.R. Loraine, D.I. Pugh, J. Collingwood, E.M. Mc Cash, A.B. Horn. *J. Appl. Phys.* **87**, 9, 4846 (2000).
- [8] И.В. Быков, Е.А. Ганьшина, А.Б. Грановский, В.С. Гущин. *ФТТ* **42**, 3, 487 (2000).
- [9] I. Bykov, E. Ganshina, V. Guschin, Y. Kalinin, A. Lichter. *Moscow Int. Symp. on Magnetism. Moscow (2002). Book of Abstracts. Editorial URSS (2002).* P. 68.
- [10] D. Bozec, V.G. Kravets, J.A.D. Matthew, S.M. Thompson. *J. Appl. Phys.* **91**, 10, 8795 (2002).
- [11] N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Masumoto, H. Fujimori. *J. Appl. Phys.* **90**, 8, 4159 (2001).
- [12] N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Masumoto, H. Fujimori. *J. Magn. Soc. Jap.* **23**, 1, 76 (1999).