

05

## Отражение электромагнитных волн от наноструктур Fe/Cr

© В.В. Устинов, А.Б. Ринкевич, Л.Н. Ромашев, Е.А. Кузнецов

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: rin@imp.uran.ru

Нижнетагильская государственная социально-педагогическая академия,  
Нижний Тагил

Поступило в Редакцию 24 января 2007 г.

Исследовано отражение электромагнитных волн миллиметрового диапазона от наноструктур Fe/Cr. Показано, что гигантский магниторезистивный эффект в наноструктуре приводит к увеличению коэффициента отражения и уменьшению коэффициента прохождения. Магнитный резонанс вызывает уменьшение как коэффициента отражения, так и коэффициента прохождения.

PACS: 81.07.-b

Физическая природа гигантского магниторезистивного эффекта (ГМРЭ) в металлических наногетероструктурах, состоящих из чередующихся слоев ферромагнитного и неферромагнитного металлов, обусловлена сильным различием вероятностей рассеяния электронов проводимости с разным направлением спина по отношению к вектору намагниченности ферромагнитного слоя. Среди разнообразных экспериментальных методов, используемых при изучении металлических мультислойных наноструктур, в последние годы довольно интенсивно развиваются электродинамические методы [1–3]. Микроволновые свойства металлической магнитной мультислойной наноструктуры существенно зависят от ее магнитного состояния. Была установлена корреляция между коэффициентом проникновения высокочастотного электромагнитного поля через наноструктуру и ее магнитосопротивлением, измеренным на постоянном токе [2]. Следует отметить, что электродинамические свойства многослойных металлических наноструктур существенно отличаются от свойств более толстых пленок, если суммарная толщина металла в наноструктурах существенно меньше глубины скин-слоя, и обычный для металлов скин-эффект здесь проявляется слабо.

Отражение электромагнитных волн от металлических наноструктур исследовано значительно меньше, чем проникновение. Из-за малости импеданса наноструктуры коэффициент отражения от нее близок к  $-1$  и зафиксировать его изменение от напряженности внешнего магнитного поля сложнее, чем коэффициента прохождения. На сегодняшний день лишь в одной известной нам работе изучался ГМРЭ по отражению микроволн от наноструктуры [4]. Там с использованием дифференциальной модуляционной методики на частоте  $70 \text{ GHz}$  было показано существование у сверхрешетки Fe/Cr нерезонансного микроволнового поглощения.

В данной работе, в отличие от ранее выполненных работ, проведены исследования микроволнового гигантского магниторезистивного эффекта и магнитного резонанса в наноструктурах Fe/Cr с использованием как высокочастотных методик отражения, так и методик прохождения. Цель работы заключалась в сопоставлении вкладов, вносимых в коэффициенты отражения и прохождения ГМРЭ и магнитным резонансом. Известно, что изменение импеданса, обусловленное ГМРЭ, приводит к уменьшению коэффициента прохождения электромагнитных волн [2,3]. Можно ожидать, что изменение коэффициента отражения, вызванное этим эффектом, будет, наоборот, положительным. Однако изменения коэффициентов как отражения, так и прохождения электромагнитных волн сквозь наноструктуру должны иметь в условиях ферромагнитного резонанса отрицательный знак, поскольку они вызваны существованием диссипативной мнимой компоненты магнитной проницаемости.

При выполнении анализа коэффициентов отражения и прохождения заменим импеданс материала многослойной наноструктуры импедансом однородной металлической среды с эффективными параметрами: удельным электросопротивлением  $\rho$  и относительной динамической дифференциальной магнитной проницаемостью  $\mu$ . Это можно сделать в интервале частот, когда пространственный масштаб изменения электромагнитного поля намного больше толщины отдельного слоя наноструктуры. Импеданс металла при нормальном скин-эффекте равен  $Z_m = [(1 + i)/\delta]\rho$ , где  $\delta = (2\rho/\omega\mu\mu_0)^{1/2}$  — глубина скин-слоя,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота. Импеданс волновода, в который помещена наноструктура, на основной модели типа  $H_{10}$  определяется по формуле  $Z = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}/[1 - (\lambda/\lambda_c)^2]^{1/2}$ . Здесь  $\lambda = c/f$  — длина волны в вакууме,  $\lambda_c = 2a$  — критическая длина волны  $H_{10}$ ,  $a$  — ширина

большей стенки прямоугольного волновода. Для коэффициентов прохождения  $D$  и отражения  $\Gamma$ , которые здесь введены как отношения комплексных амплитуд прошедшей и отраженной волны к комплексной амплитуде падающей, можно записать следующие выражения [5]:

$$D = \frac{2Z_m}{2Z_m \operatorname{ch} k_m d + Z \operatorname{sh} k_n d}, \quad \Gamma = -1 + \frac{2Z_m \operatorname{ch} k_m d}{2Z_m \operatorname{ch} k_m d + Z \operatorname{sh} k_n d}, \quad (1)$$

где  $d$  — суммарная толщина металла наноструктуры,  $k_m$  — комплексное волновое число в проводящей среде,  $k_m = (1 + i)/\delta$ . Импеданс металлической наноструктуры меньше импеданса  $Z$ ,  $|Z_m| \ll Z$ . Если справедливо неравенство  $2Z_m \operatorname{ch} k_m d \ll Z \operatorname{sh} k_m d$ , которое для металлических наноструктур толщиной более 10 nm реализуется на волнах сантиметрового и миллиметрового диапазонов, то коэффициенты прохождения и отражения принимают вид

$$D = \frac{2Z_m}{Z \operatorname{sh} k_m d}, \quad \Gamma = -1 + \frac{2Z_m}{Z} \operatorname{cth} k_m d. \quad (2)$$

Выражения (2) будем рассматривать для случая  $d \ll \delta$ . В этом предельном случае из формулы (2) следует, в частности, взаимно однозначное соответствие ГМРЭ, измеренного на постоянном токе, и изменений коэффициента передачи, если  $\mu \approx 1$  [2,3]. Будем считать, что удельное электросопротивление  $\rho$  на рассматриваемых частотах действительно, а относительная магнитная проницаемость  $\mu$  содержит действительную  $\mu'$  и мнимую  $\mu''$  части:  $\mu = \mu' - i\mu''$ . Из формулы (2) получим выражение для относительного изменения модуля коэффициента отражения в магнитном поле

$$\gamma_m = \frac{|\Gamma(H)| - |\Gamma(0)|}{|\Gamma(0)|} = \frac{2\rho}{Zd\mu(0)} \left( 1 - \frac{2\rho}{Zd\mu(0)} \right) \times \left[ 1 - \frac{(1+r)(1+m')}{1+2m'+m'^2+m''^2} \right], \quad (3)$$

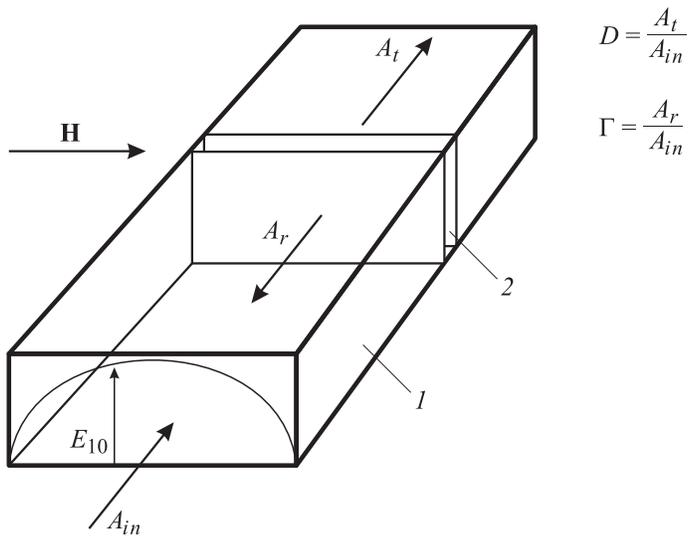
где  $|\Gamma(H)|$  — модуль коэффициента отражения, а  $\rho(H)$  — удельное электросопротивление в магнитном поле  $H$ ,  $\mu(0)$  — относительная дифференциальная проницаемость при  $H = 0$ ,  $r$  — относительное магнитосопротивление,  $r = [\rho(H) - \rho(0)]/\rho(0)$ ;  $m' = [\mu'(H) - \mu(0)]/\mu(0)$  и  $m'' = \mu''(H)/\mu(0)$  — относительные изменения действительной и мнимой частей магнитной проницаемости. Величина  $\frac{2\rho}{Zd\mu(0)} = D(0)$  для

металлических пленок толщиной более 10 nm много меньше единицы,  $D(0) \ll 1$ . Если изменения коэффициента отражения вызваны только изменением электросопротивления наноструктуры и  $\mu(0) \approx 1$ , то можно написать

$$\gamma_m = -D(0)[1 - D(0)]r. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что изменения коэффициента отражения имеют знак, противоположный знаку магнитосопротивления  $r$ . Эти изменения существенно меньше  $|r|$  по величине, но идентичны с  $|r|$  по характеру зависимости от напряженности внешнего магнитного поля. При выполнении условия магнитного резонанса  $m' = 0$ , а  $m''$  имеет максимум. Из формулы (3) следует, что в этом случае  $\gamma_m < 0$ . Отсюда видно, что два механизма взаимодействия электромагнитной волны с металлической наноструктурой приводят к изменениям коэффициента отражения разных знаков: из-за гигантского магнитосопротивления коэффициент отражения увеличивается, а в условиях магнитного резонанса уменьшается.

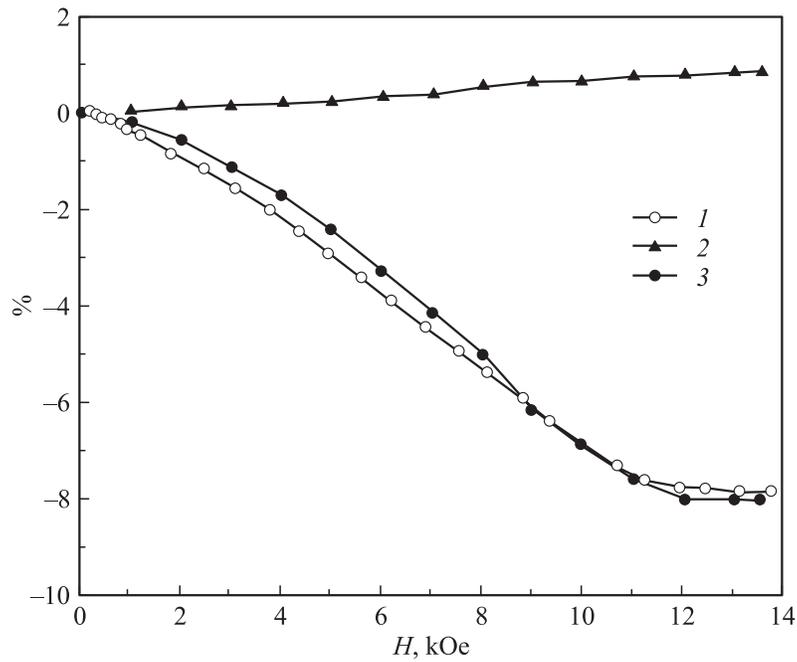
Использованные при выполнении работы наноструктуры Fe/Cr выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Вначале на подложке формировался буферный слой Cr толщиной  $\sim 80 \div 100 \text{ \AA}$ , а затем поочередно выращивались слои Fe и Cr. Скорость роста слоев составляла около  $1.5 \text{ \AA}$  в минуту. В работе использованы три наноструктуры, выращенные на монокристаллических подложках из оксида магния (MgO) и сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): сверхрешетка  $\text{MgO/Cr}(80 \text{ \AA})/[\text{Fe}(29 \text{ \AA})/\text{Cr}(13 \text{ \AA})]_4$  — образец № 1, наноструктура  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}(100 \text{ \AA})/\text{Fe}(145 \text{ \AA})/\text{Cr}(43 \text{ \AA})/\text{Fe}(145 \text{ \AA})/\text{Cr}(100 \text{ \AA})$  — образец № 2 и сверхрешетка  $\text{MgO/Cr}(85 \text{ \AA})/[\text{Fe}(9 \text{ \AA})/\text{Cr}(11 \text{ \AA})]_{40}$  — образец № 3. Цифры в круглых скобках указывают толщину слоев, а цифры у квадратных скобок — количество пар слоев. Микроволновые измерения выполнены в частотном диапазоне 26–38 GHz. Образец сверхрешетки помещался в поперечное сечение прямоугольного волновода (см. рис. 1). Изменялось изменение модуля коэффициента передачи  $D$  волновода с образцом при изменении напряженности внешнего постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}$ , и определялась величина  $r_m = [|D(H)| - |D(0)|]/|D(0)|$  — относительное изменение модуля коэффициента передачи в магнитном поле. Внешнее магнитное поле прикладывалось параллельно узкой стороне волновода перпендикулярно вектору переменного магнитного поля волны  $\mathbf{H}_\sim$ . Кроме



**Рис. 1.** Схема расположения образца наноструктуры в волноводе при микро-волновых измерениях: 1 — волновод, 2 — наноструктура.

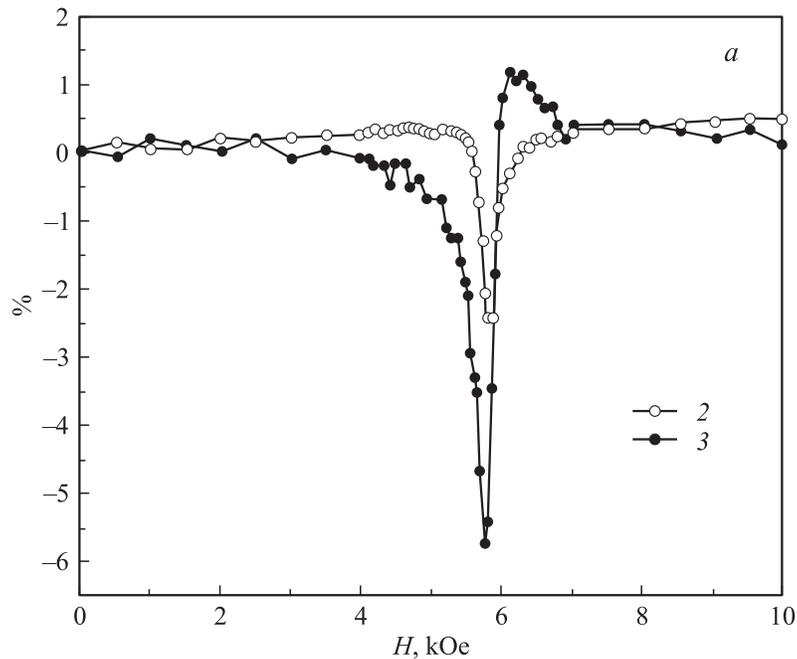
того, была развита методика измерения коэффициента отражения  $\Gamma$  электромагнитных волн. Измерялось изменение модуля коэффициента отражения от напряженности магнитного поля, и определялась величина  $\gamma_m$ .

На рис. 2 представлены результаты измерений, выполненных на частоте  $f = 32$  GHz на сверхрешетке — образце № 1. Для сравнения на рис. 2 приведена полевая зависимость относительного магнитосопротивления, полученная на этом же образце. Результаты свидетельствуют о взаимно однозначном соответствии полевых зависимостей  $r(H)$  и  $r_m(H)$ . Изменения коэффициента отражения электромагнитной волны существенно меньше, чем изменения коэффициента прохождения, и имеют, в соответствии со сказанным выше, положительный знак. Влияние магнитного резонанса на коэффициенты прохождения и отражения электромагнитной волны, падающей на мультислойную наноструктуру, показано на рис. 3. Результаты, представленные на рис. 3,а, получены на мультислойной наноструктуре Fe/Cr (образец № 2), состоящей из



**Рис. 2.** Зависимости микроволновых коэффициентов отражения и прохождения на частоте 32 GHz и статического магнитосопротивления сверхрешетки  $\text{MgO/Cr}(80 \text{ \AA})/[\text{Fe}(29 \text{ \AA})/\text{Cr}(13 \text{ \AA})]_4$  от напряженности постоянного магнитного поля. 1 — ГМРЭ, 2 — отражение, 3 — прохождение.

двух слоев Fe, разделенных прослойкой Cr толщиной 43 Å. Вследствие ферромагнитного упорядочения слоев Fe данная наноструктура не имеет ГМРЭ и наблюдаемые изменения на полевых зависимостях коэффициентов прохождения и отражения вызваны лишь магнитным резонансом. Видно, что резонансные изменения имеют отрицательный знак как для коэффициента прохождения, так и для коэффициента отражения. Форма линии резонанса в отражении и прохождении электромагнитной волны несколько различна, а резонансная особенность коэффициента отражения по величине меньше, чем особенность коэффициента прохождения.



**Рис. 3.** *a* — резонансные зависимости коэффициентов отражения и прохождения, полученные на частоте 37 GHz на образце наноструктуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}(100 \text{ \AA})/\text{Fe}(145 \text{ \AA})/\text{Cr}(43 \text{ \AA})/\text{Fe}(145 \text{ \AA})/\text{Cr}(100 \text{ \AA})$ ; 2 — отражение, 3 — прохождение. *b* — полевая зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны частотой 37 GHz от сверхрешетки  $\text{MgO}/\text{Cr}(85 \text{ \AA})/[\text{Fe}(9 \text{ \AA})/\text{Cr}(11 \text{ \AA})]_{40}$  с ГМРЭ и магнитным резонансом; 3 — прохождение.

На рис. 3, *b* показана типичная полевая зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны, падающей на металлическую сверхрешетку, в которой наблюдается как магниторезистивный эффект, так и магнитный резонанс. Представленные на рис. 3, *b* результаты измерений получены на сверхрешетке Fe/Cr (образец № 3). Видно, что коэффициент отражения с увеличением напряженности постоянного магнитного поля сначала монотонно возрастает и достигает насыщения в полях  $\sim 5$  kOe, а затем в узкой области полей вблизи 7 kOe наблюда-

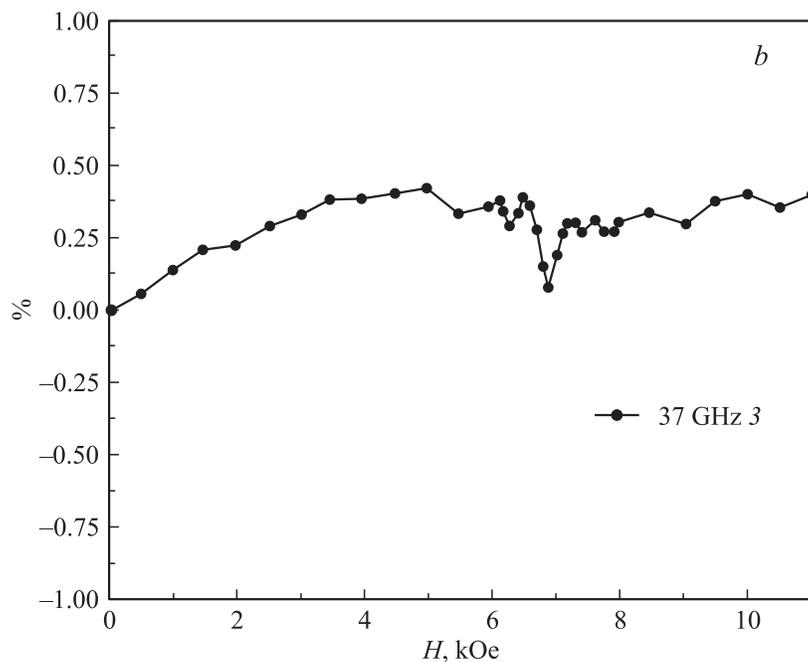


Рис. 3 (продолжение).

ется его резкое уменьшение, связанное с проявлением магнитного резонанса. Таких изменений коэффициента отражения электромагнитной волны и следовало ожидать согласно вышеизложенным теоретическим представлениям.

Итак, в данной работе показано, что явление гигантского магнитосопротивления, характерное для металлических сверхрешеток, и магнитный резонанс сказываются не только на коэффициенте прохождения электромагнитных волн, но и на коэффициенте отражения. ГМРЭ вызывает увеличение модуля коэффициента отражения волн и уменьшение модуля коэффициента прохождения. Магнитный резонанс в мультислойной наноструктуре выражается в резонансном уменьшении коэффициентов как отражения, так и прохождения электромагнитной волны.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 07-02-01289) и программ Президиума РАН „Квантовая макрофизика“ и „Низкоразмерные квантовые структуры“.

## Список литературы

- [1] *Krebs J.J.* et al. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. N 8. Pt II. P. 4795–4797.
- [2] *Ustinov V.V., Rinkevich A.B., Romashev L.N., Minin V.I.* // JMMM. 1998. V. 177–181. P. 1205–1206.
- [3] *Ринкевич А.Б., Ромашев Л.Н., Устинов В.В.* // ЖЭТФ. 2000. Т. 90. № 5. С. 834–841.
- [4] *Frait Z.* et al. // Solid State Comm. 1999. V. 112. P. 569–573.
- [5] *Семенов Н.А.* Техническая электродинамика. М.: Связь, 1972. 480 с.