——— ФИЗИКА —

УДК 537.876.4, 537.635

ВЫЗВАННЫЕ ГИГАНТСКИМ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫМ ЭФФЕКТОМ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Член-корреспондент РАН А. Б. Ринкевич^{1,*}, Д. В. Перов¹, Е. А. Кузнецов^{1,2}, М. А. Миляев¹

Поступило 08.05.2019 г.

Выполнены исследования процессов взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового диапазона с наноструктурами [Co₈₈Fe₁₂/Cu]_n, в которых проявляется гигантский магниторезистивный эффект (GMR). Установлено, что эффект GMR даёт вклад в изменения микроволнового комплексного коэффициента рефракции, в том числе в показатель преломления.

Ключевые слова: гигантский магниторезистивный эффект, магнитосопротивление, наноструктуры, коэффициент преломления, электромагнитные волны микроволнового диапазона.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0869-56524876622-625

Недавно было зафиксировано рекордное изменение микроволнового магнитосопротивления в наноструктурах [Co₈₈Fe₁₂/Cu], [1]. Возможность получения микроволнового гигантского магниторезистивного эффекта µGMR обеспечена разработкой технологии приготовления наноструктур $[(Co_{1-x}Fe_x)/Cu]_n$, обладающих гигантским магниторезистивным эффектом (GMR) [2]. Ключевое значение для исследования µGMR в обменно-связанных многослойных металлических наноструктурах имели работы [3, 4]. Впоследствии были исследованы µGMR при протекании высокочастотных токов поперёк плоскости слоёв наноструктуры [5], эффект µGMR в спиновых клапанах [6]. Микроволновые свойства сред удобно характеризовать коэффициентом рефракции, действительной частью которого является показатель преломления. Известно, что в метаматериалах показатель преломления может принимать отрицательные значения преломления [7]. В магнитоупорядоченных средах микроволновой показатель зависит от магнитного поля [8]. Как показано в [9], для характеристики неоднородности электромагнитного поля внутри среды можно ввести показатель неоднородности. В [9] было показано, что ферромагнитный резонанс (ФМР) служит причиной изменения коэффициента рефракции из-за изменения магнитной проницаемости. Коэффициент рефракции зависит также от комплексной эффективной

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева

² Российский государственный

профессионально-педагогический университет, Екатеринбург

*E-mail: rin@imp.uran.ru

диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - i\varepsilon''$. Проводимость наноструктур существенно изменяется при GMR, так что соответственно изменяется ε_{ef} . Можно ожидать, что за счёт эффекта µGMR будет изменяться коэффициент рефракции. Обнаружение этого эффекта является целью данной работы. В качестве объекта исследования выбраны сверхрешётки [Co₈₈Fe₁₂/Cu]_n. В работе будут выполнены измерения коэффициента прохождения волн миллиметрового диапазона через сверхрешётки и на основании этих измерений построены зависимости микроволновой магнитной проницаемости от магнитного поля. Измерение магнитосопротивления даёт возможность определить полевую зависимость ε_{ef} . Далее будет выполнен расчёт коэффициента рефракции и выявлен вклад в его изменение от эффекта GMR.

Сверхрешётки $[Co_{88}Fe_{12}/Cu]_n$ приготовлены методом магнетронного напыления на установке магнетронного напыления MPS-4000-C6 ("Ulvac"). Данное исследование выполнено на образце с композицией Ta(5)/PyCr(5)/[Co₈₈Fe₁₂(1,3)/Cu(2,05)]₈/Co₈₈Fe₁₂(1,3)/PyCr(3). Число в круглых скобках указывает толщину данного слоя в нанометрах. Толщина спейсера Cu выбрана таким образом, чтобы образец попадал на второй максимум GMR. Число пар слоёв *n* составляет 8. Образец выращен на подложке из стекла толщиной 0,3 мм. Структурные исследования, проведённые методом малоугловой рентгеновской дифракции, показали высокое совершенство слоистой структуры сверхрешётки.

Относительное магнитосопротивление как функция напряжённости магнитного поля определялось как $r = \left[\frac{R(H) - Rs}{Rs}\right] \cdot 100\%$, где R(H) — со-

Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург

противление в поле H, Rs — сопротивление в поле магнитного насышения. Образец сверхрешётки обладает весьма высоким магнитосопротивлением в насыщении около 28%, причём насыщение осуществляется в поле около 0,4 кЭ. Зависимость проводимости образца σ от магнитного поля показана на рис. 1.

Исследования прохождения электромагнитных волн выполнены в интервале частот 26-38 ГГц по методике, описанной в [4]. Образец сверхрешётки помещался в поперечное сечение прямоугольного волновода. Измерялось относительное изменение модуля коэффициента передачи $d_m = \frac{[|D(H)| - |D(0)|]}{|D(H)|}$ |D(0)|где |D(H)| — модуль коэффициента передачи в поле Н. Магнитное поле прикладывалось в плоскости сверхрешётки параллельно узкой стороне волновода, так что векторы постоянного Н и переменного Н₂ магнитных полей перпендикулярны друг другу. Измерения без магнитного поля и измерения магнитосопротивления дали возможность сделать оценку эффективной комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon' - i\frac{4\pi\sigma}{\omega}$ решётки. Здесь $\omega = 2\pi f$ — круговая частота. сверх-

Результаты измерений полевой зависимости коэффициента прохождения микроволн через сверхрешётку на частоте f = 38 ГГц показаны на рис. 2. Монотонное уменьшение коэффициента прохождения вызвано изменением электросопротивления образца, относительное изменение коэффициента прохождения примерно равно относительному магнитосопротивлению. Выполнение этого равенства для сверхрешёток $[Co_{88}Fe_{12}/Cu]_n$ доказано в [1].



Рис. 1. Зависимость проводимости сверхрешётки от магнитного поля при комнатной температуре.

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 487 № 6 2019



Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения от магнитного поля, измеренная на частоте f = 38 ГГц.

По ширине линии ФМР можно оценить безразмерную постоянную затухания в магнитной системе, которая оказалась равной $\alpha = 0.03$.

Зная намагниченность насыщения слоёв сверхрешётки из магнитных измерений $M_s = 1200$ Гс [2], постоянную α и предполагая форму линии ΦМР лоренцевой, можно по известным формулам из [10] восстановить высокочастотную магнитную проницаемость. Сначала рассчитываются диагональная µ и недиагональная µ_a компоненты тензора проницаемости, а затем определяется эффективная проницаемость [10]

$$\mu_{ef} = \mu - \frac{\mu_a^2}{\mu}.$$
 (1)

Действительная часть µ_{ef} отрицательна в полях, меньших поля ФМР. Мнимая часть положительна и в поле ФМР имеет максимум. Комплексный коэффициент рефракции $n_{ef} = n' - in''$ можно рассчитать по известным динамическим диэлектрической ε_{ef} и магнитной µ_{ef} проницаемостям:

$$n_{ef} = n' - in'' = \sqrt{\varepsilon_{ef} \mu_{ef}} \,. \tag{2}$$

Действительная часть коэффициента рефракции n' — это показатель преломления. На рис. 3 приведены зависимости комплексного коэффициента рефракции от магнитного поля на частоте 38 ГГц. На рисунке показаны зависимости как действительной, так и мнимой частей n_{ef}. Расчёт коэффициента рефракции n_{ef} с учётом эффекта магнитосопротивления показан на зависимостях, обозначенных $\sigma = \sigma(H)$. Как видно из рис. 3, полевые зависимости n_{ef} имеют резонансный характер. Поло10

ΦΜΡ

8

Рис. 3. Зависимости от магнитного поля действительной и мнимой частей коэффициента рефракции на частоте f = 38 ГГц.

6

жение резонанса у n_{ef} совпадает с резонансом в магнитной проницаемости. Для того чтобы выявить вклад, вызванный GMR, был выполнен расчёт для случая постоянной проводимости σ = const. Принятое значение σ = 3,5 · 10⁶ См/м соответствует проводимости образца при отсутствии магнитного поля. Как видно из рис. 3, характер зависимостей при σ = $\sigma(H)$ и σ = const сходный, но между зависимостями есть различие, которое связано с влиянием GMR на коэффициент рефракции.

Из рис. 3 видно, что действительная часть коэффициента рефракции, т.е. показатель преломления n', в полях, меньших поля ФМР, имеет отрицательный знак, что определяется выполнением неравенства [7]:

$$(\varepsilon' + |\varepsilon_{ef}|) \cdot (\mu' + |\mu_{ef}|) < \varepsilon''\mu''. \tag{3}$$

Для металлического объекта $|\varepsilon_{ef}| \approx \varepsilon''$ и (3) сводится к простому неравенству $\mu' < 0$.

Большая часть изменений проводимости образца осуществляется в полях до 0,3–0,4 кЭ, поэтому эту область полей разумно рассмотреть более подробно (рис. 4). Действительно, в этой области полей различие между зависимостями при $\sigma = \sigma(H)$ и $\sigma = \text{const}$ увеличивается по мере роста магнитного поля. Таким образом, вклад эффекта GMR в изменения микроволнового коэффициента рефракции можно считать установленным.



Рис. 4. Зависимости от магнитного поля действительной и мнимой частей коэффициента рефракции в области малых полей.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках тем "Спин" № АААА-А18-118020290104-2 и "Функция" № АААА-А19-119012990095-0. Микроволновые измерения выполнены при поддержке гранта РНФ № 17–12–01002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Ринкевич А.Б., Пахомов Я.А., Кузнецов Е.А. и др. //* Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 5. С. 42–44.
- Миляев М.А., Наумова Л.И., Устинов В.В. // ФММ. 2018. Т. 119. № 12. С. 1–5.
- Krebs J.J., Lubitz P., Chaiken A., et al. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. № 8. Pt. II. P. 4795–4797.
- Ustinov V.V., Rinkevich A.B., Romashev L.N., et al. // JMMM. 1998. V. 177–181. P. 1205–1206.
- 5. Ustinov V.V., Rinkevich A.B., Romashev L.N. // JMMM. 1999. V. 198–199. № 6. P. 82–84.
- Endean D.E., Heyman J.N., Maat S., et al. // Phys. Rev. 2011. V. 84. 212405.
- Boardman A.D., King N., Velasco L. // Electromagnetics. 2005. V. 25. P. 365–389.
- 8. *Rinkevich A.B.*, *Perov D.V.*, *Samoilovich M.I.*, *et al.* // Metamaterials. 2012. V. 6. № 1/2. P. 27–36.
- 9. *Ринкевич А.Б., Перов Д.В.* // ДАН. 2018. Т. 481. № 2. С. 138–140.
- 10. *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.

n_{ef}

Re

Im

 $\sigma = \sigma(H)$ $\sigma = const$

 $\sigma = \sigma(H)$

 $\sigma = const$

4

8000

6000

4000

2000

-2000

-4000

n

0

2

CAUSED BY THE GIANT MAGNETORESISTIVE EFFECT CHANGES OF MICROWAVE REFRACTIVE INDEX

Corresponding Member of RAS A. B. Rinkevich¹, D. V. Perov¹, E. A. Kuznetsov^{1,2}, M. A. Milyaev¹

¹M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russian Federation ²Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg, Russian Federation

Received May 8, 2019

Studies of the interaction of electromagnetic microwaves with $[Co_{88}Fe_{12}/Cu]_n$, nanostructures, in which the giant magnetoresistive effect (GMR) shows itself, have been carried out. It is established that the GMR effect contributes to changes in the microwave complex refraction coefficient, including the refractive index.

Keywords: giant magnetoresistive effect, magnetoresistance, nanostructures, refractive index, electromagnetic microwaves.