

Спин-волновой резонанс в магнитных мультислоях Co/Pd и трехслойных пленках NiFe/Cu/NiFe

Р. С. Исхаков¹⁾⁺, Н. А. Шепета^{*+)}, С. В. Столяр^{+△}, Л. А. Чеканова⁺, В. Ю. Яковчук⁺

⁺Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отд. РАН, 660036 Красноярск, Россия

^{*}Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М. Ф. Решетнева, 660014 Красноярск, Россия

[△]Красноярский государственный университет, 660041 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 28 сентября 2005 г.

После переработки 9 ноября 2005 г.

Установлено, что в трехслойной пленочной структуре NiFe(740 Å)/Cu/NiFe(740 Å) методом ферромагнитного резонанса (ФМР) в перпендикулярной конфигурации регистрируется спектр стоячих спиновых волн при толщине меди $d_{Cu} \leq 30$ Å. При толщинах $d_{Cu} > 30$ Å кривая резонансного поглощения представляла собой суперпозицию двух спектров спин-волнового резонанса (СВР) от индивидуальных ферромагнитных слоев NiFe. Для мультислойных пленок Co/Pd единые спектры СВР также наблюдались при толщинах парамагнитного слоя палладия вплоть до $d_{Pd} < 30$ Å. Рассчитана величина парциальной обменной жесткости для спиновой волны, распространяющейся через слой Pd ($A_{Pd} = 0.1 \cdot 10^{-6}$ эрг/см). Указанная величина всегда положительна (вплоть до критической толщины прослойки палладия $d_{Pd} < d_c$) либо равна нулю ($d_{Pd} > d_c$).

PACS: 75.50.Tt, 76.50.+g

Магнитные наноструктуры – современный объект исследований физики конденсированного состояния и материаловедения – ставят перед исследователями ряд важных вопросов и проблем. Одной из них является понимание механизмов связи наноструктурных составляющих. В частности, в мультислойных пленках именно межслойное взаимодействие ферромагнитных слоев через промежуточные немагнитные слои во многом определяет различные физические свойства этого класса материалов. Поэтому исследованию природы межслойного взаимодействия в этих наносистемах посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических работ [1]. Стимулом выступило открытие в данных системах эффектов, имеющих большое прикладное значение, в частности, эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС). Общепринято, что эффект ГМС (и ряд других) в мультислойных пленках обусловлен осциллирующим межслойным обменным взаимодействием ферромагнитных слоев через немагнитные промежуточные слои; ферромагнитные слои в этом случае могут быть обменно-связанными ферромагнитным или антиферромагнитным образом в зависимости от толщины немагнитного слоя [2]. Период осцилляций, знак межслойного обменного взаимодействия, а также его величина определяются из

анализа петель гистерезиса [3, 4], что связано с большим разнообразием методик, позволяющих измерять петлю гистерезиса. (Содержательный анализ эффектов связи ферромагнитных слоев через немагнитные слои в мультислойных пленках дан в [5]).

Одним из методов изучения эффектов межслойного обменного взаимодействия в мультислойных системах является метод ферромагнитного резонанса (ФМР) [6]. При этом используется специальная геометрия ФМР, при которой постоянное магнитное поле лежит в плоскости пленки (параллельная конфигурация).

Направление магнитного поля перпендикулярно плоскости пленки (перпендикулярная конфигурация) в мультислойных системах, как правило, не используется. Заметим, что в ферромагнитных пленках, так же как и в мультислойных пленках ферромагнетик/ферромагнетик, именно эксперименты в перпендикулярной конфигурации считаются наиболее информативными: они позволяют регистрировать здесь спектр обменных стоячих спиновых волн (СВР) и экспериментально определять константу обменного взаимодействия внутри ферромагнитного слоя, а также константы объемной и поверхностной анизотропии (см., например, [3]). В то же время в мультислойных пленках ферромагнетик/немагнитный благородный или переходной металл (Pd, Cu и т.д.) при измерении ФМР в перпендикулярной конфигу-

¹⁾e-mail: rauf@iph.krasn.ru

рации экспериментатор сталкивается со следующими ситуациями: линия ФМР уширилась и исчезла [7]; наблюдается широкая линия неоднородного ФМР [8]; наблюдается несколько резонансных линий [8–10]. В последнем случае выяснение природы дополнительных мод требует отдельных исследований. Цель нашего исследования – демонстрация того факта, что в мультислойных пленках Co/Pd и в трехслойных пленках NiFe/Cu/NiFe, при определенных толщинах немагнитного металла, эти дополнительные моды представляют собой моды спин-волнового резонанса.

Методика и результаты эксперимента. Исследования ФМР в перпендикулярной конфигурации проводились с помощью стандартного спектрометра *x*-band с частотой накачки резонатора $f = 9.2$ ГГц при комнатной температуре на двух типах образцов.

Поликристаллическая трехслойная структура NiFe/Cu/NiFe была получена методом термического испарения следующим образом. Первый слой NiFe пермаллового состава напылялся на стеклянную подложку в параллельном плоскости магнитном поле (~ 50 Э) для наведения одноосной анизотропии в ферромагнитной пленке. Прослойка из диамагнитной меди Cu формировалась в виде клина с максимальной толщиной ~ 50 Å, путем медленного перемещения заслонки в процессе напыления. Затем, аналогично первому, напылялся второй слой NiFe. Толщина отдельного ферромагнитного слоя в трехслойной структуре составляла 740 Å, а толщина прослойки диамагнитной Cu, изготовленной в виде клина, варьировалась от 0 до 50 Å с градиентом 0.93 Å/мм.

Мультислойные пленки Co/Pd со слоями парамагнитного палладия Pd были получены методом химического осаждения из водных растворов солей соответствующих металлов на стекло. В серии образцов Co/Pd менялась как толщина ферромагнитного слоя Co (от 30 до 260 Å), так и толщина немагнитного промежуточного слоя Pd (от 9 до 50 Å), всего 20 образцов. Слои Co имели ГЦК структуру из-за введения в осадок Co фосфора (P) в количестве 6 at % [11]²⁾.

В спектрах СВЧ поглощения, измеренных на трехслойной системе NiFe/Cu(XÅ)/NiFe вплоть до толщины диамагнитной прослойки $d_{Cu} < 30$ Å, наблюдалось до пяти хорошо идентифицируемых пиков резонансного поглощения (типичная кривая резонансного поглощения для образца NiFe/Cu/NiFe с $d_{Cu} = 13$ Å представлена на рис.1). Видно, что интенсивность

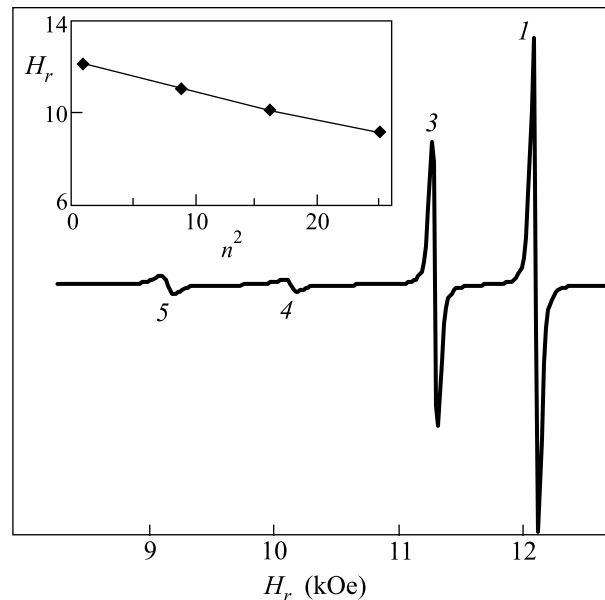


Рис.1. Типичная кривая резонансного поглощения в перпендикулярной конфигурации эксперимента на трехслойных структурах NiFe/Cu($d_{Cu} \leq 30$ Å)/NiFe (на вставке – зависимость величины резонансного поля H_r от квадрата номера моды спектра СВЧ n^2 для образца NiFe(740 Å)/Cu(13 Å)/NiFe(740 Å))

основного пика существенно превосходит интенсивности дополнительных пиков.

Для трехслойной структуры NiFe/Cu/NiFe с $d_{Cu} > 30$ Å кривая резонансного поглощения представляла собой суперпозицию двух спектров от индивидуальных ферромагнитных слоев NiFe (на рис.2 представлена кривая поглощения для образца NiFe(740 Å)/Cu(42 Å)/NiFe(740 Å), на которой хорошо проявляются дублеты основного пика и дополнительных мод).

При ортогональной ориентации во внешнем магнитном поле пленок серии Co/Pd на измеренных кривых СВЧ поглощения также наблюдались от семи до пяти резонансных мод (см. вставку к рис.3) при условии толщины слоя палладия $d_{Pd} \leq 30$ Å (15 образцов). При больших толщинах слоя ($d_{Pd} > 30$ Å) кривая СВЧ поглощения представляла собой один широкий пик ФМР.

Анализ угловой зависимости обнаруженных спектров, анализ зависимостей интенсивностей основного и дополнительных пиков, а также обнаруженный порядок в их расположении – все это указывает на то, что СВЧ спектр в данных пленках представляет собой спин-волновые моды стоячих обменных спиновых волн, то есть в этих системах нами наблюдался спин-волновой резонанс.

²⁾ Особенности структуры и магнитных свойств данных пленок Co/Pd см. также в [12].

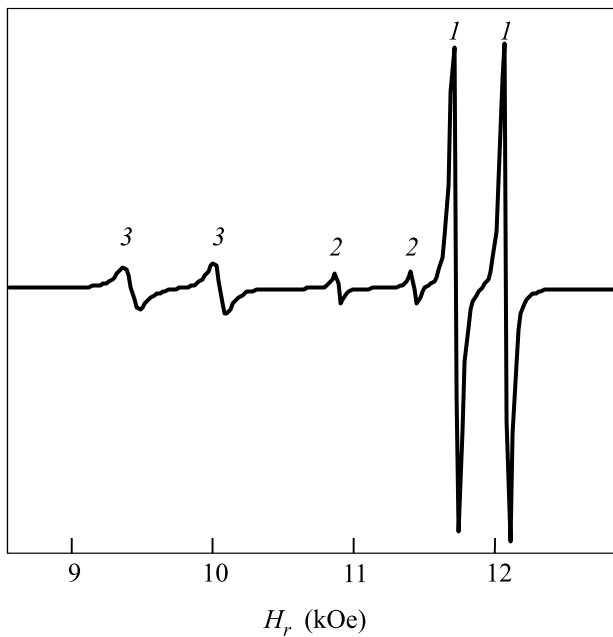


Рис.2. Типичная кривая резонансного поглощения в перпендикулярной конфигурации эксперимента на трехслойных структурах NiFe/Cu($d_{Cu} > 30 \text{ \AA}$)/NiFe

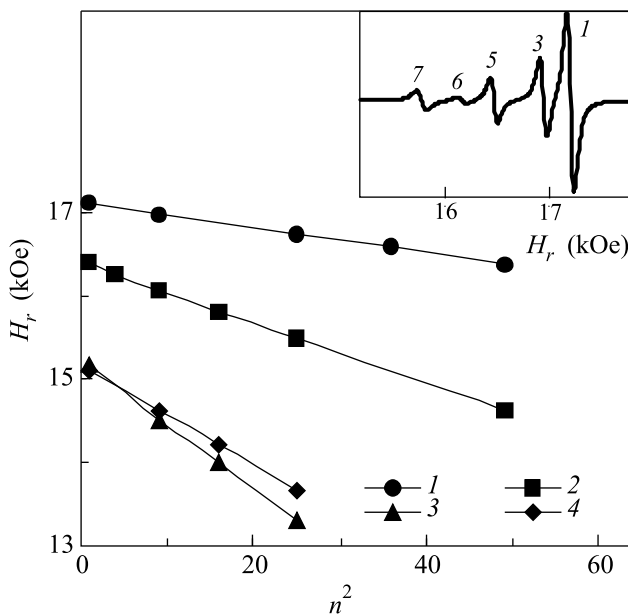


Рис.3. Зависимость величины резонансного поля в перпендикулярной конфигурации эксперимента для мультислоев Co/Pd от квадрата номера моды спектра СВР: 1: [Co(200 Å)/Pd(10 Å)] · 12; 2: [Co(100 Å)/Pd(10 Å)] · 11; 3: [Co(50 Å)/Pd(14 Å)] · 7; 4: [Co(100 Å)/Pd(30 Å)] · 25 (на вставке – вид кривой резонансного поглощения для образца [Co(200 Å)/Pd(10 Å)] · 12)

Анализ представленных спектров СВР (рис.1, рис.3) позволяет заключить, что здесь реализуется

закрепление поверхностных спинов, близкое к киттелевскому – интенсивности нечетных пиков превышают интенсивности четных пиков. Резонансные поля этих спин-волновых мод описываются стандартным киттелевским выражением:

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right) = H - 4\pi M_{\text{eff}} + \frac{2A_{\text{eff}}}{\langle M \rangle} \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2, \quad (1)$$

где n – номер пика, d – общая толщина пленки, M_{eff} и A_{eff} – величина эффективной намагниченности и константа эффективного обмена, соответственно.

При киттелевском типе закрепления поверхностных спинов значения резонансных полей H_r должны убывать прямо пропорционально квадрату номера моды n . Действительно, и для трехслойной структуры NiFe/Cu/NiFe (вставка на рис.1) и для мультислойных пленок Co/Pd (рис.3) наблюдались линейные зависимости H_r от n^2 , что указывает на реализацию в этих искусственно созданных композиционных материалах единых спектров спин-волнового резонанса.

Обсуждение экспериментальных результатов. Появление единого спектра СВР в мультислойных пленках обусловлено обменным взаимодействием ферромагнитных слоев через промежуточные немагнитные слои. Это утверждение наглядно иллюстрируется видом спектра трехслойной структуры NiFe/Cu/NiFe с $d_{Cu} > 30 \text{ \AA}$, на которой наблюдается два спектра СВР с индивидуальных слоев, каждый пик СВР испытывает дублетное расщепление (связывание, антисвязывание мод двух осцилляторов из-за магнитостатического взаимодействия [8]).

Спектр спин-волнового резонанса на мультислойной (трехслойной) слоистой структуре, по-видимому, обусловлен прохождением обменных спиновых волн через слои Pd (Cu). Последнее свидетельствует о наличии некоторого магнитного момента и частичного обмена в промежуточных слоях диамагнитной Cu и парамагнитного Pd, то есть о поляризации атомов элементов в этих слоях при их ограниченной толщине ($d_{Cu, Pd} \leq 30 \text{ \AA}$). Для мультислойной системы Co/Pd удалось рассчитать величину, характеризующую этот частичный обмен (обменную жесткость) распространения спиновой волны (при волновом векторе $k \neq 0$) через слой Pd.

По линейной зависимости H_r от n^2 может быть определена величина эффективной константы обменного взаимодействия A_{eff} всей пленки в соответствии с формулой

$$A_{\text{eff}} = \frac{\langle M \rangle}{2} \frac{H_i - H_j}{n_j^2 - n_i^2} \left(\frac{d}{\pi}\right)^2, \quad (2)$$

где d – общая толщина пленки, i, j – номера пиков СВР, $\langle M \rangle = (M_1 d_1 + M_2 d_2) / (d_1 + d_2)$. (Отметим, что при параллельной ориентации пленок во внешнем магнитном поле на спектрах мультислойных пленок Co/Pd наблюдался один пик однородного ферромагнитного резонанса [11].)

По измеренным значениям резонансных полей в перпендикулярной и параллельной конфигурациях были рассчитаны значения эффективной намагниченности M_{eff} (которые принимались равными среднему значению намагниченности всего образца $\langle M \rangle$):

$$4\pi M_{\text{eff}} = \frac{2H_{\perp} + H_{\parallel}}{2} - \sqrt{\left(\frac{2H_{\perp} + H_{\parallel}}{2}\right)^2 - (H_{\perp}^2 - H_{\parallel}^2)}. \quad (3)$$

Подставляя известные значения M_{eff} , H_r , d и n в формулу (2), для мультислоев Co/Pd получаем величины константы эффективного обмена для 15-ти исследуемых пленок (черные кружки на рис.4).

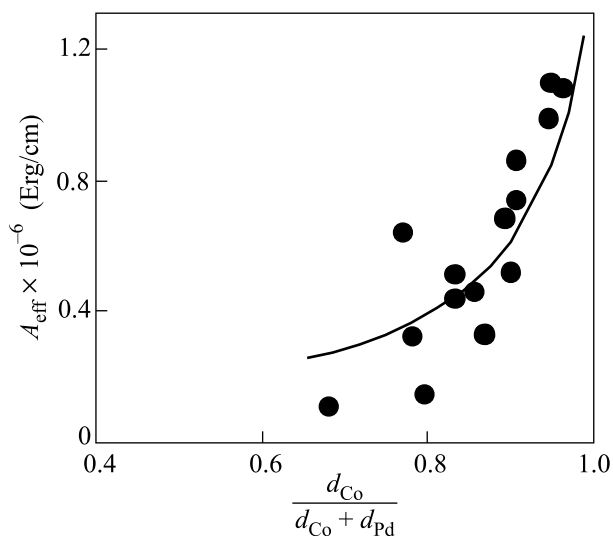


Рис.4. Зависимость величины эффективного обмена в мультислойных пленках Co/Pd от соотношения $d_{\text{Co}} / (d_{\text{Co}} + d_{\text{Pd}})$, измеренная из спектров СВР (точки); расчетная зависимость A_{eff} согласно (7) (сплошная линия)

Применяя теорию распространения волн в средах с периодической слоистой структурой, разработанную Рытовым [13, 14] для случая распространения спиновых волн в металлических мультислойных пленках [15], приходим к следующему результату. Обратная величина эффективной константы обменного взаимодействия находится как средняя величина от обратных величин парциальных обменов в отдельных слоях мультислойной структуры:

$$A_{\text{eff}}^{-1} = \langle A^{-1} \rangle. \quad (4)$$

Отсюда связь A_{eff} с парциальными обменами может быть выражена следующим образом:

$$\frac{d}{A_{\text{eff}}} = \frac{d_1}{A_1} + \frac{d_2}{A_2} + \dots, \quad (5)$$

где d_1, d_2 и т.д. – толщины индивидуальных слоев различного состава в мультислойных пленках с константами обмена в них A_1 и A_2 , соответственно; $d = d_1 + d_2 + \dots$ – период мультислойной пленки. Нетрудно показать, что в случае выполнения условия $d_1 = d_2$ выражение для A_{eff} (4), полностью эквивалентно выражению для A_{eff} , полученному для спектра спиновых волн в одномерной модели неоднородного ферромагнетика [16]:

$$A_{\text{eff}} = \langle A \rangle [1 - (\Delta A / \langle A \rangle)^2], \quad (6)$$

где $\langle A \rangle = (A_1 + A_2) / 2$, а $\Delta A = A_1 - \langle A \rangle = \langle A \rangle - A_2 \equiv (A_1 - A_2) / 2$.

Для мультислойных пленок Co/Pd величина A_{eff} , согласно формуле Рытова (4), должна описываться выражением

$$\begin{aligned} A_{\text{eff}} &= \frac{A_{\text{Co}}}{\frac{d_{\text{Co}}}{d_{\text{Co}} + d_{\text{Pd}}} + \frac{d_{\text{Pd}}}{d_{\text{Co}} + d_{\text{Pd}}} \frac{A_{\text{Co}}}{A_{\text{Pd}}}} \equiv \\ &\equiv \frac{A_{\text{Pd}}}{\frac{d_{\text{Pd}}}{d_{\text{Co}} + d_{\text{Pd}}} + \frac{d_{\text{Co}}}{d_{\text{Co}} + d_{\text{Pd}}} \frac{A_{\text{Pd}}}{A_{\text{Co}}}} \equiv \frac{(\sqrt{A_{\text{Co}} A_{\text{Pd}}})^2}{\tilde{A}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Кривая зависимости величины эффективного обмена в мультислойных пленках Co/Pd от величины отношения $d_{\text{Co}} / (d_{\text{Co}} + d_{\text{Pd}})$, рассчитанная по формуле (7), в которой $A_{\text{Co}} = 1.3 \cdot 10^{-6}$ эрг/см и $A_{\text{Pd}} = 0.1 \cdot 10^{-6}$ эрг/см, представлена на рис.4. Видно, что формула (7) вполне удовлетворительно описывает экспериментальные результаты. Отклонения экспериментальных точек от расчетной кривой могут быть объяснены естественными изменениями величин A_{Co} либо A_{Pd} вследствие дефектности индивидуальных слоев.

Итак, в статье показано, что в мультислойных пленках Co/Pd и в трехслойной структуре NiFe/Cu/NiFe регистрируется спектр спин-волнового резонанса при условии толщины немагнитного металла, меньшей критической ($d_c \sim 30 \text{ \AA}$). Прохождение бегущих обменных спиновых волн через немагнитные слои может быть обусловлено поляризацией атомов промежуточных слоев: в них индуцируется магнитный момент и некое обменное взаимодействие. В этом случае наши эксперименты позволяют установить глубину поляризации слоя атомов немагнитных металлов слоями ферромагнитных $3d$ -металлов: она оказалась равной $\sim 15 \text{ \AA}$.

На основе модели С. М. Рытова эффективной слоистой среды вычислена величина парциальной обменной жесткости для спиновой волны, распространяющейся через слой Pd ($A_{Pd} = 0.1 \cdot 10^{-6}$ эрг/см) в мультислойных пленках Co/Pd.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и ККФН “Енисей-2005” # 05-02-97709.

1. R. Skomski, *J. Phys.: Condens. Matter.* **15**, R841 (2003).
2. А. И. Морозов, А. С. Сигов, *ФТТ* **46**, 385 (2004).
3. S. S. P. Parkin, R. F. C. Farrow, R. F. Marks et al., *Phys. Rev. Lett.* **72**, 3718 (1994).
4. W. Reim, H. Brahdle, and D. Weller, *J. Magn. Magn. Mater.* **93**, 220 (1991).
5. B. Dieny, *Magnetic thin films and multilayers*, Magnetism, II, p. 255, Kluwers Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
6. J. Lindner, E. Kosubek, P. Pouloupoulos et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **240**, 220 (2002).
7. А. Б. Дровосеков, Н. М. Крейнис, В. Ф. Мешеряков и др., *Письма в ЖЭТФ* **67**, 690 (1998).
8. В. Ф. Мешеряков, *Письма в ЖЭТФ* **76**, 836 (2002).
9. Q. Y. Jin, M. Lu, Q. S. Bie et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **140-144**, 565 (1995).
10. M. Motokawa, Z. J. Wang, S. Mitsudo et al., *Phys. B* **237-238**, 247 (1997).
11. Р. С. Исхаков, Ж. М. Мороз, Л. А. Чеканова и др., *ФТТ* **45**, 846 (2003).
12. Р. С. Исхаков, Н. А. Шепета, С. В. Комогорцев и др., *ФММ* **95**, 37 (2003).
13. С. М. Рытов, *ЖЭТФ* **59**, 605 (1955).
14. С. М. Рытов, *Акуст. журнал.* **2**, 71 (1956).
15. R. P. van Staple, F. J. A. M. Greidanus, and J. W. Smits, *J. Appl. Phys.* **57**, 1282 (1985).
16. Р. С. Исхаков, *ФТТ* **19**, 3 (1977).