

Ферромагнитный и спин-волновой резонанс в мультислойных пленках Co/Pd/CoNi

© Р.С. Исхаков, Ж.М. Мороз**, Л.А. Чеканова, Е.Е. Шалыгина*, Н.А. Шепета***

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук,
660036 Красноярск, Россия

* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

** Сибирский государственный университет путей сообщения,
Красноярск, Россия

*** Сибирский аэрокосмический университет,
Красноярск, Россия

E-mail: rauf@iph.krasn.su

(Поступила в Редакцию 5 июля 2002 г.)

Установлено, что величина и знак обменного взаимодействия ферромагнитных слоев Co (5 nm) и CoNi (5 nm) через Pd зависят от ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев. При ориентации намагниченностей в плоскости слоев обменное взаимодействие может быть как ферро-, так и антиферромагнитным. При ориентации намагниченностей ортогонально плоскости слоев обмен всегда положителен (при $d_{Pd} < d_c$) и равен нулю при $d_{Pd} > d_c$ (d_c — некоторая критическая толщина слоя Pd).

Работа выполнена при поддержке гранта ККФН-РФФИ „Енисей-2002“ № 02-02-97717.

Исследованию магнитных свойств многослойных металлических систем, представляющих собой чередующиеся слои типа ферромагнетик/ферромагнетик, ферромагнетик/парамагнетик, ферромагнетик/диамагнетик, посвящено огромное количество экспериментальных и теоретических работ [1,2]. Интерес к данным объектам обусловлен возможностью создания пленочных материалов (путем подбора толщины, химических составов индивидуальных слоев) с необходимым набором магнитных характеристик. Хорошо известно, что ферромагнитные слои Fe, Co, Ni и их сплавов, разделенные слоями неферромагнитных металлов Ag, Pt, Cr, Cu и т.д., могут быть в зависимости от толщины неферромагнитного слоя обменно-связанными ферромагнитным или антиферромагнитным образом. Наличие этого обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями, разделенными металлической прослойкой, приводит к формированию в мультислойной пленке единой в магнитном отношении системы. В результате интегральные электрические и магнитные характеристики (кривые перемагничивания, перпендикулярная анизотропия и т.д.) этих мультислойных структур во многом будут определяться неким эффективным обменным взаимодействием. В то же время традиционные методики (низкотемпературный ход намагниченности насыщения, нейтронография и т.д.), используемые для определения величин обменного интеграла, описывающего взаимодействие локального магнитного момента с его ближайшим окружением в ферромагнетиках, оказываются неинформативными для изучения эффективного обмена мультислойных структур. Резонансные методы исследования — ферромагнитный (ФМР) и спин-волновой резонанс (СВР) — являются, пожалуй, единственными методиками, позволяющими

ми не только регистрировать эффекты, обусловленные этой эффективной константой обменного взаимодействия, но и измерять ее величину в таких композитных материалах, как ферромагнитные мультислойные пленки.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию спектров ферромагнитного и спин-волнового резонансов в такой сложной композиционной системе, как мультислойные пленки Co/Pd/CoNi, проведенному с целью определения параметра эффективного обменного взаимодействия и выяснения зависимости этого параметра от толщины индивидуальных слоев.

1. Экспериментальные результаты

Основное внимание в работе уделялось изучению резонансных характеристик мультислойных пленок Co/Pd, Co/CoNi, Co/Pd/CoNi в двух различных геометриях (внешнее поле параллельно и перпендикулярно плоскости пленки). Экспериментальные результаты позволили нам определить эффективные константы обменного взаимодействия этих композитных материалов и рассчитать парциальные значения константы обменного взаимодействия в индивидуальных слоях, составляющих мультислойную пленку.

Известно, что СВР является весьма чувствительным и специфическим методом исследования, накладывающим определенные требования на качество пленки (отсутствие макронеоднородности в плоскости слоев, малые значения ширины линии резонансного поглощения и т.д.). Используемый нами метод химического осаждения позволяет синтезировать качественные многослойные структуры, пригодные для исследований резонансными методами.

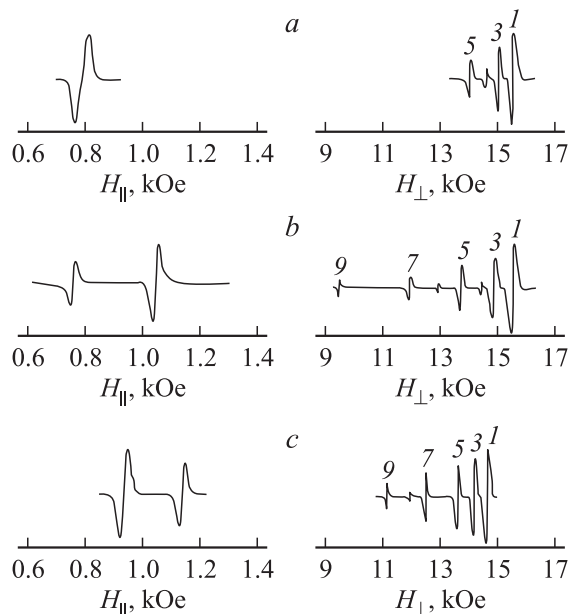


Рис. 1. Типичные резонансные спектры образцов трех серий, измеренные в двух геометриях: магнитное поле параллельно (H_{\parallel}) и перпендикулярно плоскости пленки (H_{\perp}). *a* — серия Co/Pd, *b* — серия Co/Pd/CoNi, *c* — серия Co/CoNi.

Рассмотрим спектры ФМР и СВР мультислойных пленок Co/Pd, Co/Pd/CoNi. Спектры СВР данных пленок изучались на стандартном спектрометре x-band с частотой накачки резонатора $f = 9.2$ GHz при комнатной температуре. Для ферромагнитных пленок толщиной 200 nm СВР обычно реализуется в диапазоне волновых векторов стоячих спиновых волн от 10^5 до 10^6 cm^{-1} .

Для исследования мультислойные пленки были получены химическим осаждением из водного раствора солей соответствующих металлов на стеклянную подложку. Первая серия образцов состояла из трех пар бислоев Co/Pd. При этом толщина слоев Co была постоянной: $d_1 = 5$ nm, а толщина d_2 слоев Pd изменялась от 0.5 до 4 nm, общая толщина пленок не превышала 30 nm. Проведенные нами ранее исследования рентгенограмм тонких пленок Co–P свидетельствовали о том, что при введении в раствор Co от 5 до 9 at.% P полученный осадок имел структуру, характерную для гранецентрированной кубической (ГЦК) упаковки атомов. Таким образом, введение фосфора в количестве 7 at.% обеспечило ГЦК-структуру слоям Co в мультислойных пленках Co/Pd и неискаженную ГЦК-структуру слоям Pd, осаждаемых на слои Co. Вторая серия исследуемых образцов отличалась от первой введением в мультислойную структуру Co/Pd дополнительного слоя CoNi. Присутствие 20 at.% Ni в растворе Co позволило создать в мультислойных пленках [Co/Pd/CoNi]*7 ферромагнитные слои с разной намагниченностью. Толщины ферромагнитных слоев Co и CoNi, как и в первой серии образцов, были постоянными ($d_1 = 5$ nm), а толщина d_2 слоя Pd варьировалась от 0.5 до 4 nm, суммарная тол-

щина пленок [Co (5 nm)/Pd (x)/CoNi (5 nm)]*7 менялась от 70 до 130 nm. Третья серия мультислойных пленок изготавливалась в виде [Co (X nm)/CoNi (X nm)]*10. Толщины ферромагнитных слоев Co и CoNi выбирались равными, их величина варьировалась от 2 до 10 nm, так что суммарная толщина этих пленок менялась от 40 до 200 nm.

На рис. 1 представлены резонансные характеристики образцов этих трех серий, измеренные в двух геометриях (магнитное поле параллельно и перпендикулярно плоскости пленки). Как видно из представленных экспериментальных кривых, в серии образцов Co/Pd спектр ФМР в параллельной геометрии представлен одной резонансной линией, координата (величина резонансного поля H_r) и ширина линии ΔH_r , которой слабо зависят от толщины слоя Pd. Величина этого резонансного поля может быть определена из стандартного выражения

$$\frac{\omega}{\gamma} = [H(4\pi M_{\text{eff}} + H)]^{1/2} \quad (1)$$

(γ — гиромагнитное отношение).

Пленки второй и третьей серий характеризовались особым спектром ФМР: при параллельной ориентации как пленок [Co (5 nm)/Pd (x)/CoNi (5 nm)]*7, так и пленок [Co/CoNi]*10 относительно внешнего поля в спектре ФМР уверенно наблюдались два резонансных пика: низкополевой (как оказалось обусловленный слоями Co) и высокополевой пик (обусловленный слоями CoNi). На рис. 2 приведены зависимости резонансных полей индивидуальных ферромагнитных слоев от толщины прослойки Pd в пленках Co/Pd/CoNi. Эти результаты не описываются выражением (1), которое нуждается теперь в модификации. Что касается случая перпендикулярной ориентации пленок, то здесь для всех трех серий пленок наблюдается спектр СВР. На спектрах СВР пленок Co/Pd/CoNi и Co/CoNi наблюдается до девяти пиков, на пленках Co/Pd — до пяти пиков; анализ спектров позволяет заключить, что здесь реализуется закрепление поверхностных спинов, близкое к китте-

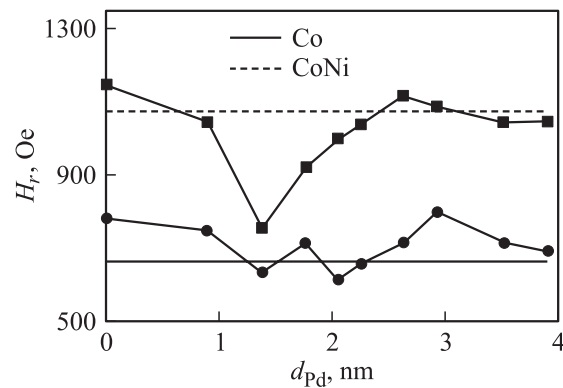


Рис. 2. Зависимость полей ферромагнитного резонанса индивидуальных ферромагнитных слоев от толщины прослойки Pd в пленках Co/Pd/CoNi при параллельной ориентации образцов во внешнем магнитном поле.

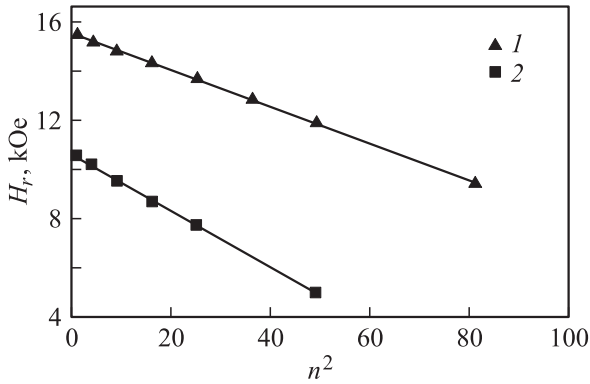


Рис. 3. Типичные зависимости резонансных полей H_r от квадрата спин-волновой моды n^2 спектров СВР серии пленок Co/Pd/CoNi. 1 — [Co (5 nm)/Pd (0.9 nm)/CoNi (5 nm)]*7, 2 — [Co (5 nm)/Pd (2.7 nm)/CoNi (5 nm)]*7.

левскому: интенсивности нечетных пиков более чем на порядок превышают интенсивности четных пиков. Угловая зависимость, поведение интенсивностей пиков и порядок их расположения указывают на то, что в данных пленках наблюдаются спин-волновые моды. Резонансные поля этих мод описываются стандартным киттелевским выражением

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

где n — номер пика, d — общая толщина пленки, M_{eff} и A_{eff} — основные параметры композиционной системы, нуждающиеся в определении. Отстраивая H_r от квадрата n , получаем возможность экспериментального измерения величины A_{eff} . На рис. 3 приведены зависимости резонансных полей H_r от квадрата спин-волновой моды n^2 спектров СВР серии мультислойных пленок [Co (5 nm)/Pd (x)/CoNi (5 nm)]*7 (вид спектра СВР приведен на рис. 1).

2. Анализ экспериментальных результатов

Выскажем предположение, что смещение резонансных пиков слоев CoNi и Co в мультислойных пленках Co/Pd/CoNi от значений H_r для реперных пленок (однослойные пленки Co и CoNi характеризовались одним резонансным пиком, соответствующим обычному ФМР) обусловлено обменной модификацией величины внутреннего поля индивидуальных слоев [3]. Выражение для этой обменной модификации может быть получено с использованием модели связанной двухслойной пленочной системы, состоящей из двух ферромагнитных слоев, взаимодействующих друг с другом через промежуточный немагнитный слой с энергией взаимодействия на единицу площади $E_{AB} = -J_E \mathbf{M}_A \mathbf{M}_B$, где J_E — величина обменного взаимодействия, а векторы \mathbf{M}_A и \mathbf{M}_B обозначают намагниченности в слоях A и B соответственно [4].

Считается, что в случае $d_A = d_B = d$ и пренебрежения полем анизотропии ($H_{K\text{eff}A} = H_{K\text{eff}B} = 0$) полная энергия для двухслойной взаимодействующей системы может быть записана в следующем виде:

$$E = [-\langle \mathbf{H} \mathbf{M}_A \rangle + 2\pi M_A^2 \cos^2 \Theta_A] d + [-\langle \mathbf{H} \mathbf{M}_B \rangle + 2\pi M_B^2 \cos^2 \Theta_B] d - J_E \mathbf{M}_A \mathbf{M}_B. \quad (3)$$

Дисперсионное соотношение для этой системы, определяемое решением уравнения Ландау–Лифшица и записанное в виде

$$\begin{aligned} (\omega/\gamma)^4 - (\omega/\gamma)^2 [H4\pi(M_A + M_B) + 8\pi J_E M_A M_B + J_E^2 (M_A + M_B)^2] + H^2 16\pi^2 M_A M_B + H 16\pi^2 M_A M_B J_E (M_A + M_B) + H4\pi J_E^2 (M_A + M_B) (M_A^2 + M_B^2) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

при больших значениях J_E имеет корни, соответствующие акустическим и оптическим колебаниям векторов намагниченности ферромагнитных слоев A и B . В случае выполнения условия $J_E \rightarrow 0$ также получаем два корня, которые и описывают две резонансные кривые для областей с различными значениями намагниченности (M_A и M_B)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega^2}{\gamma^2} \right)_1 &= 4\pi M_A H + J_E M_B M_A, \\ \left(\frac{\omega^2}{\gamma^2} \right)_2 &= 4\pi M_B H + J_E M_A M_B. \end{aligned} \quad (5)$$

Нанесение экспериментальных значений резонансных полей двух мод, полученных из спектров ФМР для мультислойных пленок Co/Pd/CoNi, на кривые, рассчитанные из выражения (5), позволило определить зависимость $J_E(d_{\text{Pd}})$. Вычисленная таким образом зависимость $J_E(d_{\text{Pd}})$ представлена на рис. 4. Рассчитанные значения J_E изменяются в пределах от 0.005

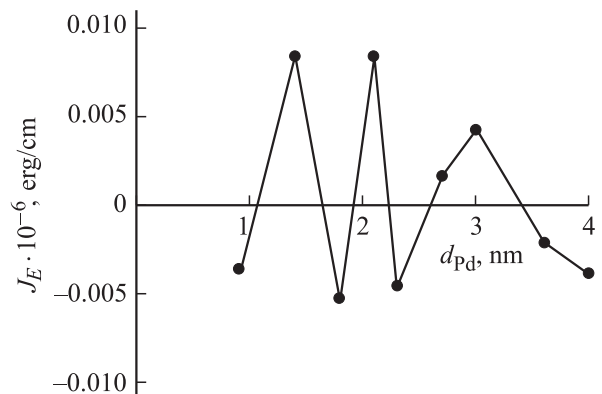


Рис. 4. Зависимость константы межслойного обменного взаимодействия в пленках Co/Pd/CoNi от толщины слоев Pd, вычисленная из спектров ФМР, полученных при параллельной ориентации пленок во внешнем магнитном поле.

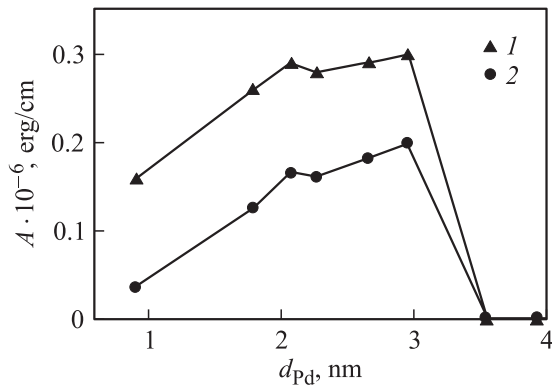


Рис. 5. Зависимость константы обмена, полученной из спектров СВР при перпендикулярной ориентации образцов во внешнем магнитном поле для пленок Co/Pd/CoNi, от толщины слоев Pd (1) и расчетная зависимость для константы обменного взаимодействия через слой палладия A_{Pd} (2).

до $0.01 \cdot 10^{-6}$ erg/cm в зависимости от толщины слоя Pd. Период осцилляций $J_E(d_{Pd})$ равен 0.7 nm. Видно, что зависимость $J_E(d_{Pd})$ описывается произведением осциллирующей функции на некую функцию f , убывающую с ростом d_{Pd} .

Поскольку в проведенных нами систематических исследованиях магнитооптических свойств (эффект Фарадея, экваториальный эффект Керра) мультислойных пленок Co/Pd, Co/Pd/CoNi [5,6] также наблюдались соответствующие осцилляции, можно сделать вывод об изменениях электронной структуры этих композитных материалов по сравнению с однослойными пленками Co. Таким образом, анализ особенностей спектра ФМР для случая пленок Co/Pd/CoNi, а также особенностей кривых намагничивания в пленках Co/Pd показывает, что индивидуальные ферромагнитные слои в этих пленках связаны между собой межслойным обменным взаимодействием J_E , величина и знак которого меняются при изменении толщины Pd.

Перейдем теперь к анализу спектров СВР. Построение линейной зависимости H_r от n^2 позволило вычислить величину эффективной константы обменного взаимодействия A_{eff} для композиционного материала, сформированного модуляциями Co/Pd, Co/Pd/CoNi, Co/CoNi. Например, на рис. 5 приведена зависимость $A_{eff}(d_{Pd})$ для пленок Co/Pd/CoNi, из которой видно, что при изменении d_{Pd} от 1 до 3 nm величина A_{eff} монотонно возрастает, а при $d_{Pd} > 3$ nm она, по-видимому, становится равной нулю. Последнее означает, что стоячих спиновых волн, распространяющихся через всю толщину образца, в мультислойных пленках Co/Pd/CoNi при толщине слоя Pd, превышающей 3 nm, нет: $A_{eff}(d_{Pd} > d_c) = 0$. Обращает на себя внимание то, что экспериментальные величины $A_{eff}(d_{Pd})$ для системы Co/Pd/CoNi существенно меньше реперных величин A_{eff} , определенных для ферромагнитных пленок Co и CoNi соответственно. В качестве реперных образцов были выбраны одно-

слойные пленки Co и CoNi толщиной 200 nm каждая. Для реперных образцов при перпендикулярной ориентации пленок во внешнем магнитном поле снимались спектры СВР, отстраивались зависимости H_r от n^2 и измерялись величины A . Полученные реперные значения $A_{Co} = 1.2 \cdot 10^{-6}$ erg/cm и $A_{CoNi} = 0.5 \cdot 10^{-6}$ erg/cm совпадают по величине с известными табличными значениями для аналогичных пленочных образцов.

Отметим, что, согласно теории, лежащей в основе метода СВР для мультислойных структур, величина эффективной константы обмена, определяемая из спектров СВР для данной мультислойной структуры (Co/Pd/CoNi), зависит как от величины парциальных обменных взаимодействий A_i , характеризующих слои Co и CoNi, так и от парциального обмена между ферромагнитными слоями, осуществляемого через слои Pd. В работе [7] предложено использовать следующее выражение для определения эффективной константы обменного взаимодействия мультислойной пленки через парциальные обмены в индивидуальных слоях ферромагнитных металлов, образующих мультислойную систему:

$$\frac{d}{A_{eff}} = \frac{d_1}{A_1} + \frac{d_2}{A_2} + \dots, \quad (6)$$

где d_1 и d_2 — толщины индивидуальных слоев различного состава в этих мультислойных пленках с константами обмена в них A_1 и A_2 соответственно, $d = d_1 + d_2$ — период мультислойной пленки. Нетрудно показать, что в случае выполнения условия $d_1 = d_2$ выражение для A_{eff} (6) эквивалентно выражению в [8]

$$A_{eff} = \langle A \rangle [1 - (\Delta A / \langle A \rangle)^2], \quad (7)$$

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

Поэтому выражение (7) может быть использовано для расчета парциальных обменов для пленок Co/CoNi, изготовленных с равными толщинами ферромагнитных слоев.

Обнаружение на спектрах СВР для этих пленок до десяти пиков, описываемых выражением (2), и построение линейной зависимости H_r от n^2 позволили вычислить величину эффективной константы обменного взаимодействия A_{eff} для данной системы [Co(x)/CoNi(x)] * 10 (кривая 1 на рис. 6). Учитывая, что толщины ферромагнитных слоев для этих мультислойных пленок одинаковы, из (6) и (7) мы получили выражение для определения значений парциальной константы обмена для CoNi

$$A_{CoNi} = \frac{A_{eff}(\alpha + 1)}{2}, \quad (8)$$

где отношение констант обмена $\alpha = A_{CoNi}^c / A_{Co}^c$ может быть заменено на отношение реперных констант, полученных из спектров СВР для реперных однослойных пленок CoNi и Co толщиной 200 nm соответственно. Полученная таким образом зависимость $A_{CoNi}(d_{Co}, d_{CoNi})$ представлена на рис. 6 (кривая 2).

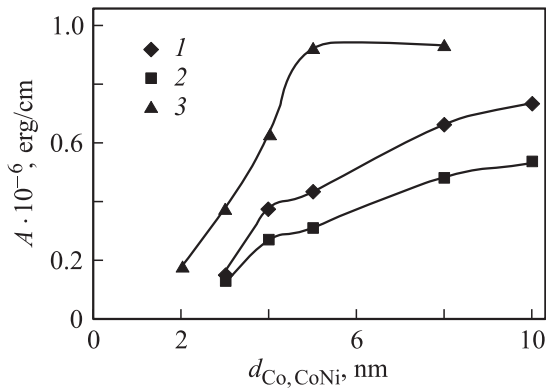


Рис. 6. Зависимость константы обменного взаимодействия от толщины ферромагнитных слоев Co, CoNi. 1 — результаты, полученные из спектров СВР для пленок Co/CoNi; 2 — рассчитанная по формуле (8) величина обмена в слоях CoNi пленок Co/CoNi; 3 — обмен, полученный из закона Блоха ($T^{3/2}$) для серии образцов $[\text{Co}(x)/\text{Pd}(1.4 \text{ nm})]^*25$.

Из зависимостей, представленных на рис. 6, видно, что численные значения величин констант эффективного и парциального обмена в пленках Co/CoNi резко падают при уменьшении толщины ферромагнитного слоя. Для образцов с толщиной ферромагнитных слоев меньше 5 nm это значение меньше реперных значений, полученных для однослойных пленок Co и CoNi. Следовательно, для слоев Co и CoNi толщиной 5 nm каждый константа парциального обмена должна браться равной $0.63 \cdot 10^{-6}$ и $0.31 \cdot 10^{-6}$ erg/cm соответственно. Отметим, что константы обмена, рассчитанные из термомагнитных кривых (закон Блоха) для пленок Co/Pd, показывают хорошее согласие с аналогичными величинами A_{Co} и A_{CoNi} , рассчитанными из спектров СВР (кривая 3 на рис. 6).

Таким образом, определив величины парциальных обменов в слоях Co и CoNi (при толщине 5 nm) и переписав выражение (6) для случая Co/Pd/CoNi в виде

$$\frac{d_{\text{Co}} + d_{\text{Pd}} + d_{\text{CoNi}}}{A_{\text{eff}}} = \frac{d_{\text{Co}}}{A_{\text{Co}}} + \frac{d_{\text{Pd}}}{A_{\text{Pd}}} + \frac{d_{\text{CoNi}}}{A_{\text{CoNi}}}, \quad (9)$$

из экспериментальных значений A_{eff} можем вычислить величины A_{Pd} — константы обменного взаимодействия через слой Pd в мультислойных пленках $[\text{Co}(5 \text{ nm})/\text{Pd}(x)/\text{CoNi}(5 \text{ nm})]^*7$. Расчеты величины A_{Pd} были проведены по формуле

$$A_{\text{Pd}} = \frac{A_{\text{eff}} d_{\text{Pd}}}{(2d_{\text{Co, CoNi}} + d_{\text{Pd}}) - A_{\text{eff}} d_{\text{Co, CoNi}} (1/A_{\text{Co}} + 1/A_{\text{CoNi}})}, \quad (10)$$

где $d_{\text{Co, CoNi}}$ и d_{Pd} — толщины ферромагнитного слоя и слоя палладия соответственно, A_{Co} и A_{CoNi} — константы парциального обменного взаимодействия в слоях Co и CoNi.

На рис. 5 также представлены результаты такого расчета парциальной константы обменного взаимодействия

через слой Pd в зависимости от толщины прослойки для мультислойных пленок Co/Pd/CoNi. Видно, что вычисленные величины $A_{\text{Pd}}(d_{\text{Pd}})$ меньше величин A_{eff} в два-три раза. Однако функциональная зависимость $A_{\text{Pd}}(d_{\text{Pd}})$ оказалась подобной зависимости $A_{\text{eff}}(d_{\text{Pd}})$. Отметим вывод, следующих из данных, представленных на рис. 5: $A_{\text{Pd}}(d_{\text{Pd}})$ всегда положительна, плавно возрастает с увеличением толщины прослойки палладия вплоть до критической толщины d_c .

Результаты наших экспериментов показывают, что модель, обычно используемая для описания взаимодействия ферромагнитных слоев через слой немагнитного металла и определяющая это взаимодействие в виде квазигейзенберговского изотропного гамильтониана $J_{12}(d_y) \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2$, должна быть модифицирована. Простейшая модификация заключается в следующем. Известно, что анизотропный гейзенберговский гамильтониан записывается как

$$H = -2 \sum_{j>i} \sum [J_z S_i^z S_j^z + J_{\perp} (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y)], \quad (11)$$

где S_i и S_j — спины соседних атомов (верхние индексы обозначают проекции спиновых функций на соответствующие оси декартовой системы координат), J_z — составляющая параметра обменного взаимодействия в проекции на ось z , J_{\perp} — та же величина в проекции на плоскость xy . Соответственно, если плоскость исследуемой мультислойной пленки совпадает с плоскостью xy выбранной системы координат, при параллельной ориентации образца во внешнем магнитном поле по измеренным спектрам ФМР может быть определена только J_{\perp} -составляющая параметра обменного взаимодействия. В этом случае логично допущение, что исследование СВР дает информацию о z -проекции указанной величины.

Таким образом, в рамках сделанных допущений из наших экспериментов следует, что в мультислойных пленках Co/Pd/CoNi проекция параметра обмена в плоскости пленки (xy) имеет осциллирующий характер при увеличении толщины слоя палладия (измерения ФМР), тогда как значения z -составляющей параметра обмена (вычисленные из спектров СВР) плавно возрастают при увеличении толщины прослойки палладия вплоть до критической величины и всегда положительны ($d < d_c$) либо равны нулю ($d > d_c$). Следовательно, экспериментальные результаты проведенной нами работы показывают наличие в мультислойных пленках Co/Pd/CoNi анизотропного обменного взаимодействия и могут быть описаны при введении анизотропного квазигейзенберговского гамильтониана

$$H = J_{12}^z(d_y) M_{1z} M_{2z} + J_{12}^{\perp}(d_y) (M_{1x} M_{2x} + M_{1y} M_{2y}). \quad (12)$$

Здесь методом ФМР определяются величина и вид функции $J_{12}^{\perp}(d_y)$, а методом СВР — величина и вид функции $J_{12}^z(d_y)$, причем компоненты J (как видно из кривых на рис. 4 и 5) могут характеризоваться совершенно разными функциональными зависимостями.

Список литературы

- [1] Z.J. Wang, S. Mitsudo, K. Watanabe. *J. Magn. Magn. Mater.* **176**, 127 (1997).
- [2] P. Grunberg. *J. Phys.: Cond. Matter.* **13**, 7691 (2001).
- [3] Р.С. Исхаков, Ж.М. Мороз, Е.Е. Шалыгина, Л.А. Чеканова, Н.А. Шепета. *Письма в ЖЭТФ* **66**, 7, 487 (1997).
- [4] A. Lauade. *J. Magn. Magn. Mater.* **92**, 143 (1990).
- [5] Р.С. Исхаков, Ж.М. Мороз, И.С. Эдельман. Л.А. Чеканова. *Письма в ЖЭТФ* **63**, 9, 735 (1996).
- [6] E.E. Shalyguina, N.I. Tsidaeva, R.S. Iskhakov, J.M. Moroz. *J. Magn. Soc. Jap.* **21**, Suppl., S2, 181 (1997).
- [7] R.P. van Stapele, F.J.A.M. Greidanus, J.W. Smits. *J. Appl. Phys.* **57**, 4, 1282 (1985).
- [8] Р.С. Исхаков. *ФТТ* **19**, 3 (1977).