

УДК 537.6

## СПИН-ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС В МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ FeNiP/Pd

© 2014 г. Р. С. Исхаков<sup>1</sup>, Л. А. Чеканова<sup>1</sup>, С. В. Столяр<sup>1,2</sup>, И. Г. Важенина<sup>3</sup>

E-mail: rauf@iph.krasn.ru

Проведены исследования ферромагнитного и спин-волнового резонансов мультислойных пленок FeNiP/Pd, полученных методом химического осаждения. Определена величина парциальной константы обменного взаимодействия поляризованных слоев Pd:  $A_{Pd} \approx 1 \cdot 10^{-7}$  эрг/см.

DOI: 10.7868/S0367676514040218

Спин-волновым резонансом (СВР) называется явление возбуждения стоячих обменных спиновых волн однородным переменным полем в тонкой магнитной пленке. Выражение для резонансных полей имеет вид

$$H_p = \omega/\gamma + 4\pi M_{\text{эф}} - \eta k^2, \quad (1)$$

где  $\eta = 2A/M_0$  – спин-волновая жесткость (или дисперсионный коэффициент) материала, в котором распространяются спиновые волны, волновой вектор  $k = n(\pi/d)$  определяется числом полуволн  $n$ , укладываемых по толщине пленки  $d$ .  $M_{\text{эф}}$  – эффективная намагниченность, отличающаяся от намагниченности насыщения  $M_0$  вкладом, обусловленным упругими напряжениями,  $A$  – константа обменного взаимодействия.

В настоящее время интенсивно исследуют мультислойные ферромагнитные пленки, что обусловлено многочисленными физическими эффектами, обнаруженными в этих структурах. В работе [1] теоретически и экспериментально для мультислойных пленок Fe/Ni было показано, что при СВР измере-

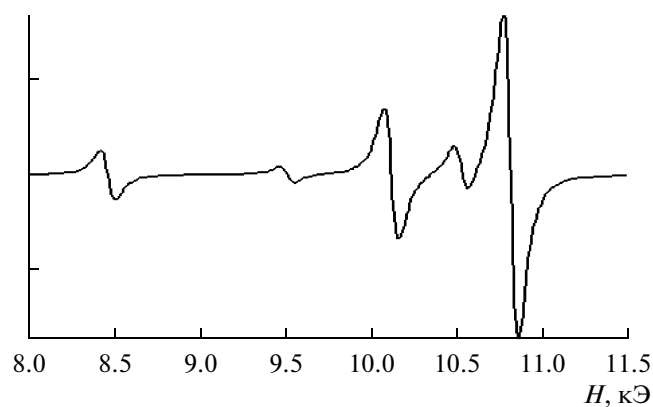
нии выполняется закон (1), где  $\eta = \frac{2A_{\text{эф}}}{\langle M \rangle}$ .  $A_{\text{эф}}$  – мо-

дифицированная константа обменного взаимодействия композитной структуры,  $d$  – толщина мультислойной пленки  $d = N(d_1 + d_2)$ ,  $N$  – количество бислоев. Связь  $A_{\text{эф}}$  с парциальными обменными

константами индивидуальных слоев дается следующим выражением:

$$\frac{d}{A_{\text{эф}}} = N \left( \frac{d_1}{A_1} + \frac{d_2}{A_2} \right). \quad (2)$$

Спектры СВР в мультислойных пленках ферромагнитный металл/неферромагнитный металл регистрировали в ряде работ: [2] на пленке  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Zr}$ , в [3] на пленке  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{W}_{90}\text{Ti}_{10}$ , в [4] на пленке Co/Pt, в [5] на пленке Co/Pd, в [6] на пленке NiFe/DyCo/NiFe. Регистрация спектра СВР в таких структурах свидетельствует о возбуждении в них стоячих обменных спиновых волн, которые обусловлены прохождением обменных спиновых волн через слои неферромагнитного металла. Последнее означает наличие некоторого магнитного момента и парциального обменного взаимодействия в промежуточных слоях, т.е. поляризацию этих слоев в мультислойной структуре при их ограниченной толщине. С помощью выражения (2) при условии регистрации спектров СВР появляется возможность определения величины



**Рис. 1.** Спектр СВР [FeNi(40 Å)/Pd(10 Å)] · 25 при перпендикулярной ориентации внешнего поля к плоскости пленки с содержанием P 2% в сплаве FeNi.

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск.

<sup>2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Сибирский федеральный университет”, Красноярск.

<sup>3</sup> Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Иркутский государственный университет путей сообщения” Красноярский институт железнодорожного транспорта.

**Таблица 1.** Намагниченность насыщения  $M_0$  и эффективная намагниченность  $M_{эф}$  для образцов  $[(Fe_{32}Ni_{68})_{98}P_2/Pd] \cdot N$  и  $[(Fe_{20}Ni_{80})_{98}P_2/Pd] \cdot N$ 

	$M_{эф}$ , Гс	$M_0$ , Гс
$[Fe_{32}Ni_{68}(150)/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 15$	518	709
$[Fe_{32}Ni_{68}(30)/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 25$	696	780
$[Fe_{20}Ni_{80}(120)/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 20$	874	690
$[Fe_{20}Ni_{80}(70)/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 20$	616	440
$[Fe_{20}Ni_{80}(50)/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 25$	576	424

парциальной обменной константы для спиновой волны, распространяющейся через поляризованные металлические слои.

В данной работе были исследованы мультислойные пленки FeNiP/Pd методами ферромагнитного и спин-волнового резонанса. Цель – определение величины константы обменного взаимодействия поляризованных слоев Pd.

Мультислойные пленки FeNiP/Pd, а также однослойные реперные пленки FeNiP различных составов получены методом химического осаждения на покровное стекло. Концентрация фосфора в пленках изготовленных сплавов составляла 2 и 10 ат. %. Общая толщина пленок  $[Fe_{1-x}Ni_x/Pd(10 \text{ \AA})]$  составляла 2000 Å. Исследования проводили методами ФМР и СВР на частоте  $f = 9.2$  ГГц при комнатной температуре в полях до 20 кЭ, измерения намагниченности насыщения – на вибрационном магнетометре при комнатной температуре в интервале полей до 12 кЭ.

В табл. 1 представлены значения  $M_{эф}$  полученных пленок. Здесь же приведены величины  $M_0$ , измеренные на магнетометре. Различия между  $M_{эф}$  и  $M_0$  обусловлены наличием упругих напря-

**Таблица 2.** Величины эффективного обменного взаимодействия  $A_{эф}$  и  $A_{Pd}$  для пленок  $[(Fe_{32}Ni_{68})_{98}P_2/Pd] \cdot N$  с содержанием P 2% в сплаве FeNi

	$A_{эф} \cdot 10^{-6}$ , эрг/см	$A_{Pd} \cdot 10^{-6}$ , эрг/см
$[FeNi(150 \text{ \AA})/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 15$	0.475	0.11
$[FeNi(120 \text{ \AA})/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 10$	0.424	0.09
$[FeNi(90 \text{ \AA})/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 20$	0.57	0.04
$[FeNi(60 \text{ \AA})/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 20$	0.4	0.14
$[FeNi(30 \text{ \AA})/Pd(10 \text{ \AA})] \cdot 25$	0.16	0.05

жений в изучаемых структурах и концентрационной зависимостью константы магнитострикции ( $M_{эф} = M_0 + 3\lambda\sigma/M_0$ , где  $\lambda$  – константа магнитострикции исследуемого материала,  $\sigma$  – величина локальных напряжений). Результаты, представленные в таблице, указывают на реализацию в данных мультислойных структурах сжимающих упругих напряжений,  $\sigma < 0$ .

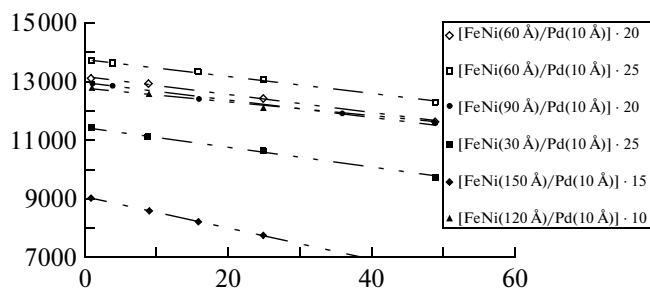
При ортогональной ориентации пленок во внешнем магнитном поле регистрировали спектр СВР (рис. 1). На рис. 2 представлены зависимости  $H_p(n^2)$ . Представленные зависимости позволяют определить величину  $A_{эф}$  мультислойных структур, а также, используя значения константы обменного взаимодействия однослойных реперных пленок, рассчитать величину парциального обменного взаимодействия поляризованных слоев Pd. Полученные значения приведены в табл. 2.

Приведенные значения  $A_{Pd}$  согласуются с величинами  $A_{Pd}$ , определенными из спектров СВР мультислойных структур Co/Pd [5].

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Stapele R.P., Greidanus F.J.A.M., Smits J.W. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 4. P. 1282.
2. Biondo A., Nascimento V.P., Lassri H. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 277. P. 144.
3. Morales M.A., Lassri H., Biondo A. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2003. V. 256. P. 93.
4. Salhi H., Chafai K., Msieh O., Lassri H. et al. // J. Supercond. Novel Magn. 2011. V. 24. № 5. P. 1375.
5. Исхаков. P.C., Шенета H.A., Столяр C.B. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 83. Вып. 1. С. 31.
6. Исхаков P.C., Столяр C.B., Чижик M.B. и др. // J. Siberian Federal Univ. Mathematics & Physics. 2012. V. 5(3). С. 370.

**Рис. 2.** Зависимости величины резонансного поля  $H$  от квадрата номера моды  $n^2$  спектров СВР, наблюдаемых в перпендикулярной геометрии эксперимента для мультислойных пленок  $[(Fe_{32}Ni_{68})_{98}P_2/Pd] \cdot N$  с содержанием фосфора 2 ат. %.