

УДК 537.624.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖСЛОЕВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ FeNi/Bi/FeNi

© 2012 г. Г. С. Патрин^{1,2}, В. Ю. Яковчук¹, Д. А. Великанов¹, К. Г. Патрин^{1,2}, С. А. Яриков¹

E-mail: patrin@iph.krasn.ru

В работе приведены результаты экспериментальных исследований межслоевых взаимодействий в пленках FeNi/Bi/FeNi. Методами СКВИД-магнитометрии и магнитного резонанса показано, что межслоевое взаимодействие зависит как от толщины висмутовой прослойки, так и от температуры. Обнаружен эффект гигантского магнитосопротивления.

Многослойные магнитные пленки с неметаллической прослойкой, в частности, в системе ферромагнитный металл/полупроводник [1] или с полуметаллической прослойкой привлекают внимание исследователей в силу богатого разнообразия эффектов, наблюдаемых в этих пленках. Когда в качестве прослойки используется полупроводниковый материал, возникает возможность управлять свойствами прослойки и межслоевого взаимодействия (J) путем внешних воздействий (примеси, различного рода излучения, температура, магнитные поля и т.д.).

В таком плане создание пленочных структур, которые сохранили бы чувствительность к внешним воздействиям, но обладали бы большими эффектами взаимодействия между магнитными слоями, представляет собой заманчивую задачу. Один из путей решения этой проблемы видится в использовании полуметаллической прослойки Bi вместо полупроводникового материала. Во-первых, согласно фазовой диаграмме [2], в системах 3d-металл–висмут большинство элементов не образуют соединений. Во-вторых, висмут сам по себе обладает необычными физическими свойствами как для объемных, так и для пленочных образцов. В висмуте длина свободного пробега электрона может достигать макроскопических масштабов, при этом она зависит от толщины слоя, температуры и магнитного поля, также меняются концентрация и подвижность носителей тока.

Ранее [3] нами были впервые синтезированы и исследованы трехслойные пленки NiFe/Bi/NiFe. Пермаллой был выбран в качестве магнитного слоя в силу его малой магнитной кристаллографической анизотропии, чтобы не затушевывать межслоевое взаимодействие. Были синтезированы пленки с разными соотношениями содержания

железа и никеля, чтобы проследить за конкуренцией собственной магнитной энергии и энергии межслоевого взаимодействия на формирование магнитного состояния. Для всех пленок толщины магнитного слоя были $t_{\text{NiFe}} \approx 10$ нм, а толщина висмута варьировалась в пределах $t_{\text{Bi}} = 3\text{--}15$ нм. Величина t_{NiFe} была выбрана из соображений, чтобы она была довольно малой, но в то же время достаточной для того, чтобы намагниченность магнитного слоя более не менялась от его толщины. Толщины слоев определялись методами рентгеновской спектроскопии. Электронно-микроскопические исследования показали, что слои являются сплошными по площади и их состав соответствует номинальному. Никаких следов присутствия 3d-Bi-соединений не обнаружено. Измерения магнитных и температурных зависимостей намагниченности показали, что межслоевое взаимодействие зависит от толщины висмутовой прослойки. Установлено, что форма кривой $\sigma(H)$ изменяется при увеличении толщины слоя висмута (см. рис. 1). В частности, для контрольной пленки с $t_{\text{Bi}} = 0$ петля гистерезиса является узкой и кривая намагниченности имеет ферромагнитный тип. Для пленок с $t_{\text{Bi}} \neq 0$ ширина гистерезиса кривых намагничивания немонотонно зависит от толщины t_{Bi} , что связывается с включением межслоевого взаимодействия. Коэрцитивная сила (H_c) увеличивается по мере увеличения толщины висмутовой прослойки почти в 3 раза, достигая максимума около $t_{\text{Bi}} \sim 13$ нм, и затем снова уменьшается. Этот результат согласуется с результатами работы [4], где установлено, что период осцилляций межслоевого взаимодействия в пленках CoFe/Bi/CoFe составляет более 10 нм. Из вида кривых намагничивания видно, что при комнатных температурах межслоевая связь ослабевает настолько, что четко прослеживаются вклады от разных слоев [5]. При этом коэрцитивная сила при комнатных температурах уменьшается более чем на порядок.

¹ Учреждение Российской академии наук Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск.

² Сибирский федеральный университет, Красноярск.

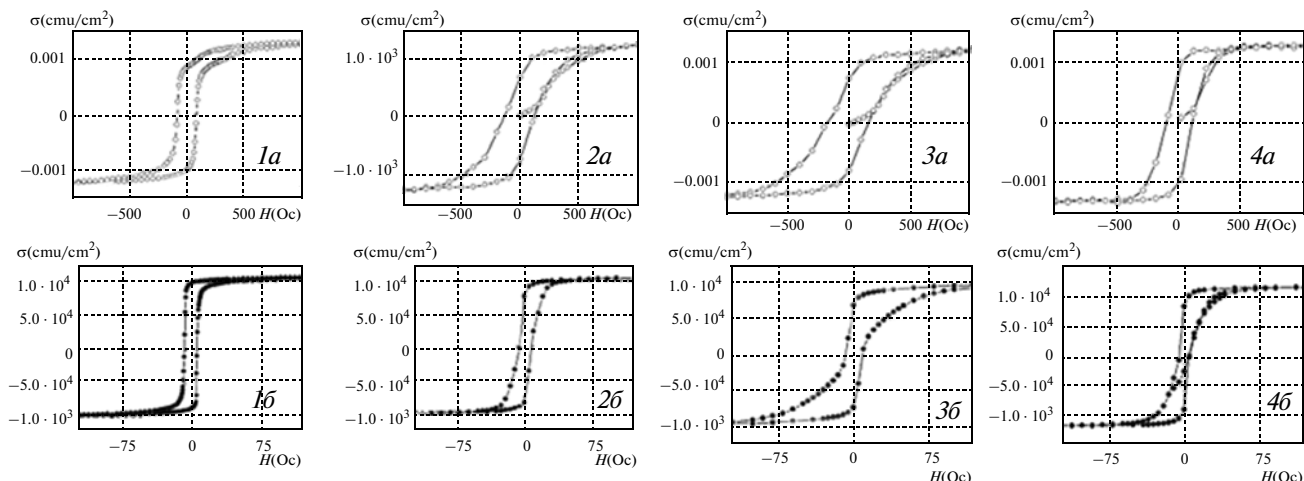


Рис. 1. Полевые зависимости намагниченности пленок NiFe/Bi/NiFe: *a* – $T = 4.2$ К, *б* – $T = 300$ К. $t_{\text{NiFe}} = 10$ нм (1, 2, 3, 4); $t_{\text{Bi}} = 0, 8, 13$ и 15 нм соответственно.

Были также проведены спектральные исследования полярного эффекта Керра в диапазоне длин волн $\lambda = 400\text{--}800$ нм при комнатной температуре. В этом случае также не наблюдаются простые по-

добные друг другу зависимости от толщины висмутовой прослойки.

Однако магнитостатические данные не позволяют однозначно ответить на вопрос о величине и поведении межслоевого взаимодействия, поэтому мы использовали метод электронного магнитного резонанса с целью изучения характера изменения межслоевого обмена при изменении температуры.

Установлено, что в интервале толщин висмута $t_{\text{Bi}} = 3\text{--}12$ нм спектр магнитного резонанса состоит из двух линий (см. рис. 2), что указывает на антиферромагнитный характер межслоевого взаимодействия между ферромагнитными слоями. Для контрольной пленки с $t_{\text{Bi}} = 0$ нм и для пленок с $t_{\text{Bi}} \geq 15$ нм наблюдается одиночная линия магнитного резонанса. Были измерены температурные зависимости параметров магнитного резонанса, использованные для установления температурных зависимостей J (см. вставки на рис. 2).

Экспериментальные результаты были обработаны путем теоретической подгонки спектров магнитного резонанса для трехслойной магнитной пленки. В применении к нашему случаю свободная энергия на единицу площади имеет следующий вид:

$$E = -J \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - t_{\text{FM}} \left[\vec{H} (\vec{M}_1 + \vec{M}_2) - 4\pi (M_{1Z}^2 + M_{2Z}^2) \right], \quad (1)$$

где J – константа межслоевого обменного взаимодействия, \vec{H} – внешнее магнитное поле, \vec{M}_i – намагниченность i -го ферромагнитного слоя, φ_i – угол намагниченности в плоскости пленки (отсчитываемый от направления внешнего магнитного поля), $i = 1, 2$ нумеруют ферромагнитные слои, t_{FM} – толщина магнитного слоя, ось Z перпендикулярна плоскости пленки. При вычислении мы полагаем, что $(t_{\text{FM}} H M) \gg J$ и ферро-

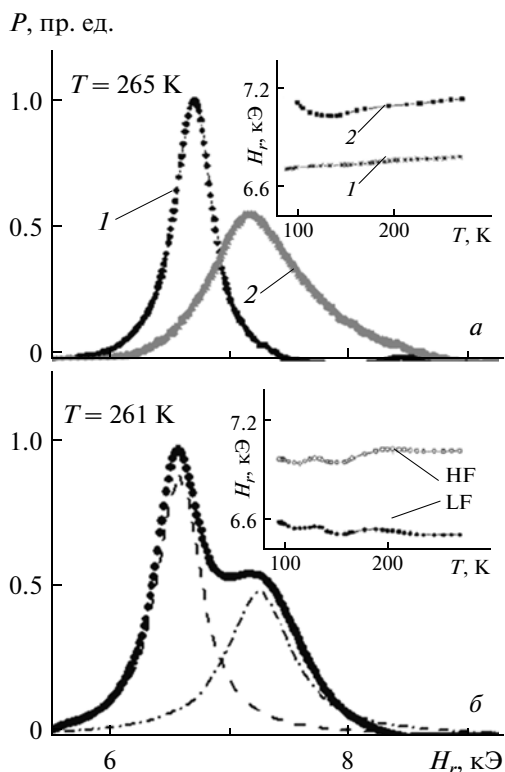


Рис. 2. Спектры магнитного резонанса пленок NiFe/Bi/NiFe при разных толщинах висмута; $t_{\text{NiFe}} = 10$ нм, *a* – пленки с 1 – $t_{\text{Bi}} = 0$ нм и 2 – $t_{\text{Bi}} = 15$ нм; *б* – пленка с $t_{\text{Bi}} = 6$ нм. На вставках приведены температурные зависимости значений резонансного поля соответствующих пленок, LF и HF – низкочастотная и высокочастотная ветви колебаний.

магнитные слои находятся в насыщенном состоянии, так что $\varphi_i \approx \varphi_H = 0$. Также предполагается, что оба ферромагнитных слоя идентичны. При этих условиях резонансные частоты даются следующими выражениями:

$$(\omega_1/\gamma)^2 = H(H + H_M), \quad (2)$$

$$(\omega_2/\gamma)^2 = H(H + H_M) + 2(2H + H_M)H_J + 4H_J^2, \quad (3)$$

где

$$H_M = 4\pi M \text{ и } H_J = J/(t_{FM}M). \quad (4)$$

Поскольку величины ω , H , и M известны из эксперимента, можно, используя выражение (3), легко найти H_J и затем из выражения (4) определить константу межслоевого взаимодействия J .

Обработка температурных зависимостей резонансного поля позволила установить температурные зависимости межслоевого взаимодействия (см. рис. 3).

Как видно из рис. 3, константа межслоевого взаимодействия зависит от температуры, слабо увеличиваясь по величине с ростом температуры, при $T = 100$ К обменное поле $H_J = J/(t_{NiFe}\sigma)$ примерно равно -150 , -200 , -250 и $+400$ Э для пленок с $t_{Bi} = 4, 6, 12, 15$ нм соответственно. При температурах $T \geq 225$ К константы выходят на одинаковую зависимость. Но при больших толщинах висмута взаимодействие между ферромагнитными слоями еще заметно проявляется, что следует из смещения линии магнитного поглощения для пленки с $t_{Bi} = 15$ нм относительно контрольной пленки $t_{Bi} = 0$ нм и ее большей ширины линии.

В этих пленках были обнаружены магнитосопротивление порядка единицы процентов и зависимость его величины от толщины висмутовой прослойки. Но этот момент будет предметом отдельного исследования.

Основные полученные экспериментальные результаты сводятся к следующему:

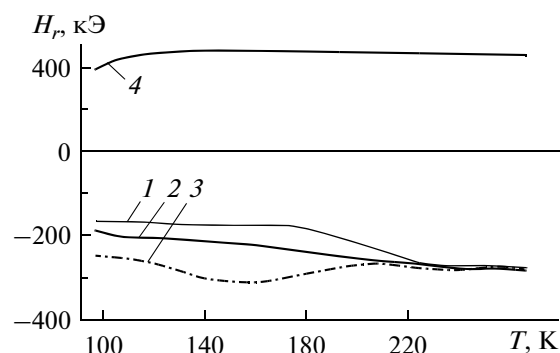


Рис. 3. Рассчитанные температурные зависимости обменного поля для пленок NiFe/Bi/NiFe. 1, 2, 3, 4 – $t_{Bi} = 4, 6, 12, 15$ нм соответственно.

обнаружено влияние полуметаллической прослойки Bi на величину и знак межслоевого взаимодействия в структуре NiFe/Bi/NiFe, зависящее от толщины немагнитной прослойки;

методом магнитного резонанса показана зависимость межслоевого взаимодействия от температуры.

Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00675-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Patrin G.S., Vas'kovskii V.O.* // Fiz. Met. Metall. 2006. V. 101. Suppl. 1. P. S63.
2. *Денисов В.М., Белоусова Н.В., Мусеев Г.С. и др.* Висмутосодержащие материалы: Структура и физико-химические свойства. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000, 430 с.
3. *Patrin G.S., Yakovchuk V.Yu., Velikanov D.A.* // Phys. Lett. A. 2007. V. 363. P. 164.
4. *Harada Y., Nakanishi Y., Daibo M. et al.* // Physica B. 2003. V. 329–333. P. 1109.
5. *Skomski R.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. V. 15. № 7. P. R841.