

05

## Магнитный резонанс в пленках FeNi/Bi/FeNi

© К.Г. Патрин<sup>1,2</sup>, С.А. Яриков<sup>1,2</sup>, В.Ю. Яковчук<sup>1</sup>, Г.С. Патрин<sup>1,2</sup>,  
Ю.П. Саломатов<sup>2</sup>, В.Г. Плеханов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Академгородок,  
Красноярск

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск  
E-mail: patrinkg@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 июня 2015 г.

Представлены экспериментальные результаты магниторезонансных исследований трехслойных пленок FeNi/Bi/FeNi с немагнитной полуметаллической прослойкой. Показано, что спектр СВЧ-поглощения имеет сложный вид, который зависит от толщины немагнитной прослойки. В интервале толщин прослойки Bi, равном 3–15 nm, межслоевое взаимодействие носит антиферромагнитный характер.

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.).

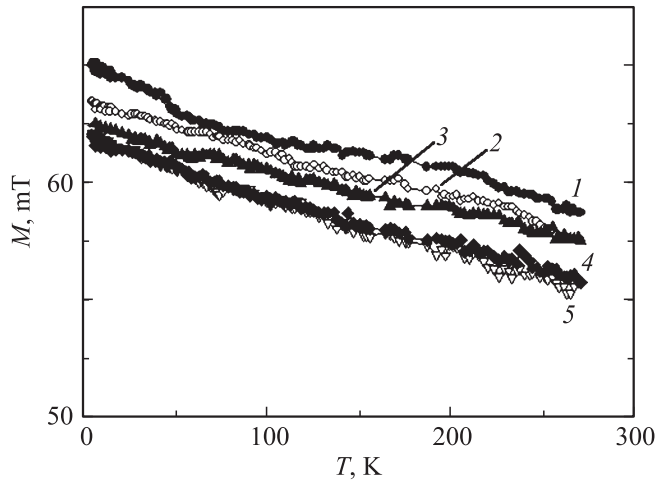
Создание пленочных структур, которые сохранили бы чувствительность к внешним воздействиям, но обладали бы большими эффектами взаимодействия между магнитными слоями, представляет собой заманчивую задачу. Один из путей решения этой проблемы видится в использовании полуметаллической прослойки Bi вместо полупроводникового материала. Во-первых, согласно фазовой диаграмме [2], в системах 3d-металл–висмут большинство элементов не образует соединений и, следовательно, граница раздела различных слоев не будет размытой. Во-вторых, висмут и его соединения обладают необычными физическими свойствами и имеют важное значение для применений

как в объемном [3], так и в пленочном состояниях [4]. Большая часть исследований посвящена изучению Bi-содержащих полупроводниковых сплавов в качестве материала для инфракрасных приемников [5] или многослойных пленок 3d-висмут [6] для микроэлектромеханических (MEMS) устройств.

Также важно, что в монокристаллах висмута длина свободного пробега электрона может достигать макроскопических масштабов, в пленочном состоянии она зависит от толщины слоя, температуры и магнитного поля, также меняются концентрация и подвижность носителей тока.

Ранее [7] 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 с тем, чтобы проследить за конкуренцией собственной магнитной энергии и энергии межслоевого взаимодействия на формирование магнитного состояния. В данном случае содержание железа было 18 at.%, а никеля — 82 at.%. В одном цикле напылялись две пленки с различной толщиной висмута, причем в двух последовательных напылениях повторялась пленка из предыдущей серии с большей толщиной висмута ( $t_{\text{Bi}}$ ). Для всех пленок толщины магнитного слоя были  $t_{\text{NiFe}} \approx 10$  nm, а толщина висмута варьировалась в пределах  $t_{\text{Bi}} = 3-15$  nm. Величина  $t_{\text{NiFe}}$  была выбрана из соображений, чтобы она была довольно малой, но в то же самое время достаточной для того, чтобы намагниченность насыщения магнитного слоя более не менялась от флуктуаций 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 соединений 3d-металл–Bi не обнаружено. Намагниченность измерялась на СКВИД-установке MPMS-XL. Спектры магнитного резонанса снимались на спектрометре с частотой СВЧ-излучения  $f_{\text{UHF}} = 26.7$  GHz в температурном диапазоне  $T = 90-300$  K. Магнитное поле лежало в плоскости пленки. Анизотропии резонансного поля в плоскости не наблюдается.

Измерения магнитных и температурных зависимостей намагниченности показали, что межслоевое взаимодействие зависит от толщины висмутовой прослойки. Установлено [8], что форма кривой  $M(H)$

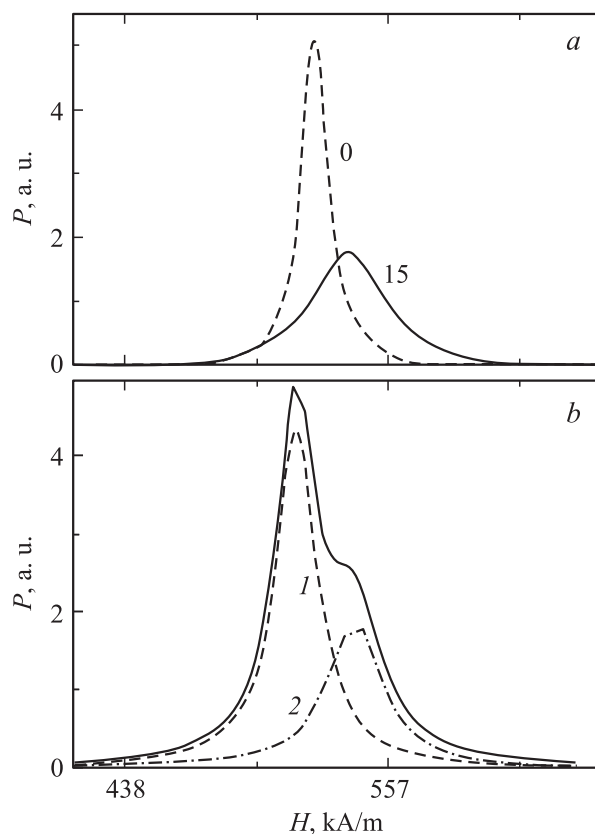


**Рис. 1.** Температурные зависимости намагниченности насыщения пленок FeNi/Bi/FeNi. 1–5 —  $t_{\text{Bi}} = 0, 4, 6, 11, 15$  nm соответственно.

изменяется при увеличении толщины слоя висмута. 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  $t_{\text{Bi}}$ , что связывается с включением межслоевого взаимодействия. Коэрцитивная сила ( $H_c$ ) увеличивается по мере увеличения толщины висмутовой прослойки почти в три раза, достигая максимума около  $t_{\text{Bi}} \sim 13$  nm, и затем снова уменьшается. Этот результат согласуется с результатами работы [9], где установлено, что период осцилляций межслоевого взаимодействия в пленках CoFe/Vi/Co составляет более 10 nm.

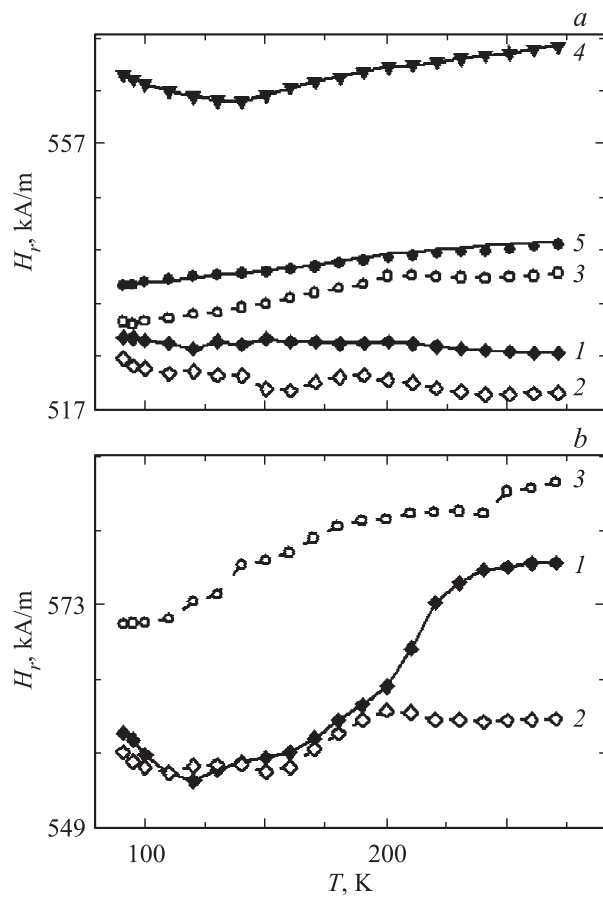
С целью изучения характера изменения межслоевого обмена при изменении температуры и толщины немагнитного слоя мы использовали метод электронного магнитного резонанса.

Для данной серии пленок температурные зависимости намагниченности насыщения приведены на рис. 1. Отметим, что поле насыщения намагничивания этих пленок в гелиевых температурах не превышает 40 kA/m. Эти зависимости хорошо описываются зависимостью типа  $M \sim \ll T^{3/2} \gg$ . Видно, что при увеличении толщины немагнитной



**Рис. 2.** Спектры электронного магнитного резонанса: *a* — 0 —  $t_{\text{Bi}} = 0$  nm, 15 —  $t_{\text{Bi}} = 15$  nm; *b* —  $t_{\text{Bi}} = 4$  nm.  $T = 228$  K.

прослойки намагниченность насыщения пленочной структуры хоть и незначительно ( $\sim 5\%$ ), но уменьшается (кривые 2–4) и перестает изменяться при  $t_{\text{Bi}} > 11$  nm (кривые 4, 5). Это может быть связано с образованием на границе раздела металл–полуметалл либо „мертвого“ слоя в ферромагнетике, либо слоя немагнитного сплава за счет взаимной диффузии элементов. Нельзя исключить и такой механизм, как перераспределение поляризованных электронов проводимости за счет



**Рис. 3.** Температурные зависимости резонансного поля в пленках FeNi/Bi/FeNi. *a* — низкополевой пик на рис. 2 (кривая 1); *b* — высокополевой пик (рис. 2, кривая 2). 1–5 —  $t_{\text{Bi}} = 4, 6, 11, 15$  и  $0$  nm соответственно. Для кривой 5 точки — эксперимент, сплошная линия — расчет по формуле (1).

перетекания из ферромагнетика в объем полуметалла по типу спиновой аккумуляции [10].

Установлено, что для контрольной пленки с  $t_{\text{Bi}} = 0$  nm и для пленок с  $t_{\text{Bi}} \geq 15$  nm форма кривой СВЧ-поглощения имеет вид одиночной

лоренцевской линии. В интервале толщин висмута  $t_{\text{Bi}} = 3\text{--}12\text{ nm}$  спектр магнитного резонанса состоит из двух линий (рис. 2), что может быть связано с антиферромагнитным характером межслоевого взаимодействия между ферромагнитными слоями. Были получены температурные зависимости параметров магнитного резонанса. Видно, что положение низкополюсового пика в спектре магнитного резонанса слабо зависит от толщины немагнитной прослойки и температуры (рис. 3, *a*), тогда как зависимость высокополюсового пика от этих параметров заметно сильнее (рис. 3, *b*). Для реперной пленки с  $t_{\text{Bi}} = 0\text{ nm}$  была рассчитана температурная зависимость резонансного поля по формуле

$$(\omega/\gamma)^2 = H(H + H_M), \quad (1)$$

где все обозначения традиционные, а  $H_M = 4\pi M$ , и значения  $M$  взяты из рис. 1 (кривая 1). Наблюдается хорошее согласие расчета и эксперимента, а это значит, что при этих температурах величина анизотропии ферромагнитного слоя крайне мала. Изменение намагниченности при введении висмутовой прослойки не дает значений  $H_r$ , представленных на рис. 3, *a*. Ясно, что наличие висмута ведет к возникновению дополнительных взаимодействий, изменяющих магнитную динамику пленочной структуры. При больших толщинах висмутовой прослойки резонансный спектр снова трансформируется в одиночную линию, что указывает на ферромагнитное межслоевое взаимодействие, но с другими параметрами магнитного резонанса. Такое поведение можно понять, если предположить, что наряду с появлением межслоевого взаимодействия, возможно, возникает интерфейсная анизотропия.

Таким образом, основные полученные экспериментальные результаты сводятся к обнаружению влияния полуметаллической прослойки Bi на величину и знак межслоевого взаимодействия в структуре NiFe/Bi/NiFe, зависящего от толщины немагнитной прослойки, что проявляется как изменение спектра электронного магнитного резонанса.

Более детальное исследование механизмов, ответственных за формирование магнитного состояния в пленках NiFe/Bi/NiFe и спиновой динамики будет представлено в другой работе.

Работа выполняется в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР (задание № 3.2534.2014/К) и частично при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00238-а).

## Список литературы

- [1] *Patrin G.S., Vas'kovskii V.O.* // Fiz. Met. Metalloved. 2006. V. 101. Suppl. 1. P. S63.
- [2] *Денисов В.М., Белоусова Н.В., Мoiseев Г.С.* и др. Висмут-содержащие материалы. Структура и физико-химические свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 430 с.
- [3] *Левицкий Ю.Т., Палажченко В.И., Левицкая Н.В.* Полуметаллы, их сплавы и соединения. Владивосток: Дальнаука, 2004. 241 с.
- [4] *Комник Ю.Ф.* Физика металлических пленок. М.: Атомиздат, 1979. 263 с.
- [5] *Bismuth-Containing Compounds/ Eds by H. Li, Z.M. Wang.* N.Y.: Springer Science+Business Media, 2013. 379 p.
- [6] *Hozumi T., Le Clair P., Mankey G.* et al. // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 17A737.
- [7] *Patrin G.S., Yakovchuk V.Yu., Velikanov D.A.* // Lett. A. 2007. V. 363. P. 164.
- [8] *Patrin K.G., Yakovchuk V.Y., Patrin G.S., Yarikov S.A.* // Sol. St. Phenom. 2012. V. 190. P. 439.
- [9] *Jen-Hwa Hsu, Sahu D.R.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 192 501.
- [10] *Maekawa S., Takahashi S., Imamura H.* // Spin Dependent Transport in Magnetic Nanostructures. London: Taylor & Francis, 2002. P. 143.