

МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖСЛОЕВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПЛЕНКАХ FeNi/Bi/FeNi

К.Г. Патрин^{1,2}, С.А. Яриков², В.Ю. Яковчук¹, Г.С. Патрин^{1,2}, В.Г. Плеханов²

¹Институт физики им.Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Россия;

²Сибирский федеральный университет, проспект Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия.
E-mail: patrin@iph.krasn.ru

MAGNETIC RESONANCE INVESTIGATIONS OF INTERLAYER COUPLING IN FeNi/Bi/FeNi FILMS

K.G. Patrin^{1,2}, S.A. Yarikov², V.Yu. Yakovchuk¹, G.S. Patrin^{1,2}, V.G. Plekhanov²

¹Institute of Physics n.a. L.V. Kirensky, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Krasnoyarsk, 660036 Russia;

²Siberian Federal University, 79 Svobodny ave., Krasnoyarsk, 660041 Russia
E-mail: patrin@iph.krasn.ru

В работе представлены результаты исследований межслоевых взаимодействий в трехслойных пленках FeNi/Bi/FeNi методом магнитного резонанса. Показано, что заметную роль в формировании магнитного состояния пленочной структуры играет магнитная анизотропия на интерфейсе *пермаллой-висмут*. Установлено, что период колебаний межслоевого взаимодействия составляет более 10 нм. Определены температурные зависимости межслоевого обмена и интерфейсной анизотропии.

The results of investigations of interlayer coupling in trilayer FeNi/Bi/FeNi films by magnetic resonance method have been presented in the paper. It has been shown that magnetic anisotropy on *permalloy-bismuth* interface plays appreciable role for forming of magnetic state of film structure. It has been established that the interlayer coupling's oscillations period comprises more 10 nm. The temperature dependences of the interlayer exchange and interface anisotropy have been determined.

Многослойные пленочные магнитные структуры привлекают внимание исследователей поскольку, комбинируя очередность нанесения слоев, материалы как магнитного, так и немагнитного слоев, а также подбирая количество слоев в структуре можно создавать материалы, обладающие уникальными свойствами. Пленочные системы, состоящие из чередующихся слоев ферромагнитного металла и полупроводника [1], являются перспективными объектами для практического использования в устройствах спиновой электроники [2]. Межслоевое взаимодействие в таких системах является ответственным за формирование магнитного состояния. И в том случае, когда межслоевое взаимодействие является регулируемым, есть основание ожидать новых проявлений и эффектов. Если в качестве прослойки используются материалы с неметаллическим типом проводимости, например, полупроводник, возникает возможность управлять свойствами прослойки и межслоевого взаимодействия (J) путем внешних воздействий (примеси, различного рода излучения, температура, магнитные поля и т.д.), что может иметь практическое значение.

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 в системах *3d-металл—висмут* большинство элементов не образуют соединений, что делает границу раздела

материалов резкой. Во-вторых, 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. В силу чего висмут и его соединения обладают необычными физическими свойствами, как в объемном, так и в пленочном состояниях.

Пермаллой был выбран в качестве магнитного слоя в силу его малой магнитной кристаллографической анизотропии, чтобы не затушевывать межслоевое взаимодействие. Были синтезированы пленки с содержанием железа 18 at.% и 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. Для всех пленок толщины магнитного слоя были, $t_{\text{NiFe}} \approx 10 \text{ nm}$, а толщин висмута варьировалась в пределах $t_{\text{Bi}} = 3 \div 15 \text{ nm}$. Величина t_{NiFe} была выбрана из соображений, чтобы она была довольно малой, но в то же самое время, достаточной для того, чтобы намагниченность магнитного слоя более не менялась от его толщины. Толщины слоев определялись методами рентгеновской спектроскопии. Электронно-микроскопические измерения показали, что слои являются сплошными по площади и их состав соответствует номинальному. Никаких следов присутствия 3d-Bi соединений не обнаружено. Структура поверхности пленок исследовалась на атомном силовом микроскопе Veeco Multi Mode (разрешение $\sim 1 \text{ nm}$). Высота шероховатости поверхности не превышает 2.5 nm. Это значит, что при использованных использованных толщинах немагнитной прослойки контактных «закороток» между соседними магнитными слоями быть не может. Намагниченность измерялась на СКВИД-установке MPMS-XL. Спектры магнитного резонанса снимались на спектрометре с частотой СВЧ-излучения $f_{\text{УHF}} = 26.7 \text{ GHz}$ в температурном диапазоне $T = 90\text{--}300 \text{ K}$. Магнитное поле лежало в плоскости пленки. Анизотропии резонансного поля в плоскости пленки не наблюдается.

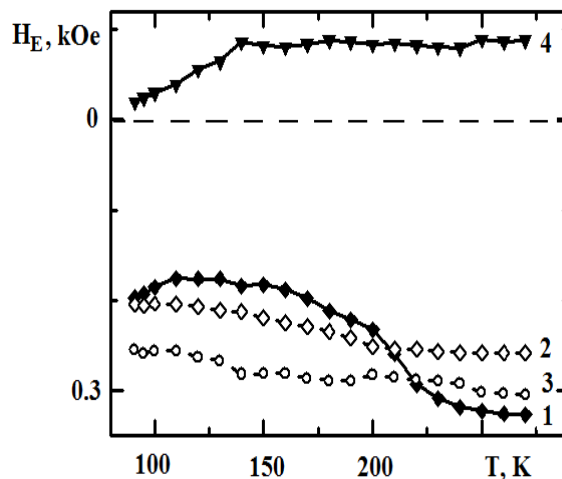


Рис.1: Температурные зависимости обменного поля для пленок FeNi/Bi/FeNi. 1, 2, 3, 4 — $t_{\text{Bi}} = 4, 6, 11, 15 \text{ nm}$, соответственно

Измерения магнитных и температурных зависимостей намагниченности показали, что межслоевое взаимодействие зависит от толщины висмутовой прослойки. Показано, что форма кривой $M(H)$ изменяется при увеличении толщины слоя висмута. Коэрцитивная сила (H_C) увеличивается по мере увеличения толщины висмутовой прослойки почти в три раза, достигая максимума около $t_{\text{Bi}} \sim 13 \text{ nm}$, и затем снова уменьшается. Получено, что для контрольной пленки без висмутовой прослойки и для пленок с $t_{\text{Bi}} \geq 15 \text{ nm}$ форма кривой СВЧ-поглощения имеет вид одиночной лоренцевской линии. В интервале толщин висмута $t_{\text{Bi}} = 3 - 12 \text{ nm}$ спектр магнитного резонанса состоит из двух линий, что указывает на антиферромагнитный характер межслоевого взаимодействия между ферромагнитными слоями. Считаем, что низкополевая линия соответствует акустическим колебаниям намагниченности пленочной структуры, а высокополевая линия относится к оптической моде колебаний. Были получены температурные зависимости резонансных полей, которые использовались далее для установления температурных зависимостей поля анизотропии (H_A) и обменного поля (H_E). Установлено, что зависимость низкополевой линии от температуры является практической линейной, а высокополевая линия для пленок с $t_{\text{Bi}} = 4$ и 6 nm в области $T \approx 200 \text{ K}$ имеет особенность.

Для установления механизмов, ответственных за поведение магниторезонансных параметров, экспериментальные результаты были обработаны путем теоретической подгонки параметров магнитного резонанса для трехслойной магнитной пленки. Для реперной пленки с $t_{\text{Bi}} = 0$ nm была рассчитана температурная зависимость резонансного поля. Наблюдается хорошее согласие расчета и эксперимента, а это значит, что при этих температурах величина анизотропии ферромагнитного слоя крайне мала. Получено, что для всех пленок с $t_{\text{Bi}} \neq 0$ для объяснения температурных зависимостей резонансного поля акустической моды необходим учет дополнительной дополнительной магнитной анизотропии. Результаты расчетов показали, что поле анизотропии имеет немонотонный характер в зависимости от толщины прослойки висмута. Эти результаты можно понять, если предположить, что на интерфейсе образуется слой, обладающий магнитной анизотропией.

Из температурных зависимостей резонансных полей оптической моды были рассчитаны температурные зависимости обменных полей, определяющих межслоевое взаимодействие (см. Рис.1). Таким образом, основные полученные экспериментальные результаты сводятся к обнаружению влияния полуметаллической прослойки Bi на величину и знак межслоевого взаимодействия в структуре NiFe/Bi/NiFe, зависящее от толщины немагнитной прослойки, что проявляется как изменение спектра электронного магнитного резонанса.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00238-а).

Список использованных источников:

1. Patrín G.S., Vas'kovskii V.O. // *Fiz. Met. Metalloved.* // 2006. V.101. Suppl.1. P.563.
2. Jonker B.T. *Electrical Spin Injection into Semiconductors.* // In book: *Ultrathin Magnetic Structures IV. Applications of Nanomagnetism* Ed. by B. Heinrich, J.A.C. Bland (Springer, Berlin, Heidelberg, 2005) P.19.