

05;06;07;09;12

Сэндвичи пермаллой–медь–пермаллой со взаимно перпендикулярными осями анизотропии в магнитных слоях

© В.П. Кононов, А.Е. Худяков, Т.П. Морозова, В.К. Чернов, О.Н. Пискунов, В.С. Жигалов, Г.В. Бондаренко, И.С. Эдельман, С.Г. Овчинников

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

(Поступило в Редакцию 6 мая 1996 г.)

В сверхвысоком вакууме получены слоистые структуры FeNi–Cu–FeNi со взаимно перпендикулярными ориентациями осей легкого намагничивания в слоях FeNi и исследованы их физические свойства: ферромагнитный резонанс, квазистатическое перемагничивание, фарадеевское вращение плоскости поляризации световой волны.

Введение

Современные тонкопленочные технологии открывают практически неограниченные возможности создания искусственных материалов, включающих в себя разнородные по структуре и физическим свойствам компоненты, разделенные резкими границами. В случае магнитных материалов, например, можно конструировать мультислойные структуры с различной ориентацией оси анизотропии в магнитных слоях. Это позволяет, с одной стороны, выявить новые особенности магнитных взаимодействий через немагнитные прослойки, а с другой стороны, создавать спиральные магнитные структуры с заданными параметрами спирали. Первым шагом на пути исследования таких структур могло бы явиться изготовление сэндвичей ферромагнетик–немагнитный металл–ферромагнетик со взаимноперпендикулярной ориентацией осей анизотропии в ферромагнитных слоях.

Взаимодействие магнитных слоев с одинаковой ориентацией осей анизотропии в зависимости от толщины разделяющего их слоя немагнитного металла изучалось многими авторами [1–4]. Особенности такого взаимодействия, связанные с различной ориентацией осей анизотропии, до последнего времени не изучались. Недавно появилась работа [5], в которой представлены петли гистерезиса пленок пермаллой–медь–пермаллой со взаимно перпендикулярными осями легкого намагничивания, которые создавались наложением внешних магнитных полей в процессе напыления пленок. В настоящей работе приведены результаты исследования магнитного резонанса, петель гистерезиса и магнитооптического эффекта Фарадея в пленках FeNi–Cu–FeNi со взаимно перпендикулярной ориентацией осей анизотропии в слоях FeNi, созданных за счет косоного напыления пленок FeNi.

Методика и результаты эксперимента

Образцы изготавливались термическим напылением в сверхвысоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии "Ангара", имеющей предельное остаточное давление $1.3 \cdot 10^{-8}$ Па. Слои Fe–Ni и Cu осаждались

из отдельных тиглей, изготовленных из нитрида бора, на стеклянные подложки, которые специально не подогревались. Скорость испарения составляла для Cu ~ 5 nm/min, для FeNi — 0.3–0.5 nm/min. На подложку осаждался подслой меди для обеспечения большей однородности слоев пермаллой за счет нивелирования неровностей подложки. Оптимальная толщина слоя Cu ~ 20 nm была определена предварительным экспериментом, в котором толщина Cu изменялась ступенчатым образом вдоль поверхности подложки, благодаря применению при испарении пленки перемещающейся маски. Состав распыляемого металла Fe₂₀Ni₈₀. Однако в полученных пленках концентрация Ni составляла $\sim 78\%$ по данным рентгеновского флуоресцентного анализа.

Направление оси легкого намагничивания в слоях FeNi задавалось наклонным падением атомарного пучка на подложку. Как было показано еще в [6], при наклонном падении испаряемого металла на подложку образуются цепи кристаллитов, перпендикулярные направлению падения, и, кроме того, происходит удлинение кристаллитов в направлении падающего пучка. Эти факторы приводят к возникновению оси легкого намагничивания,

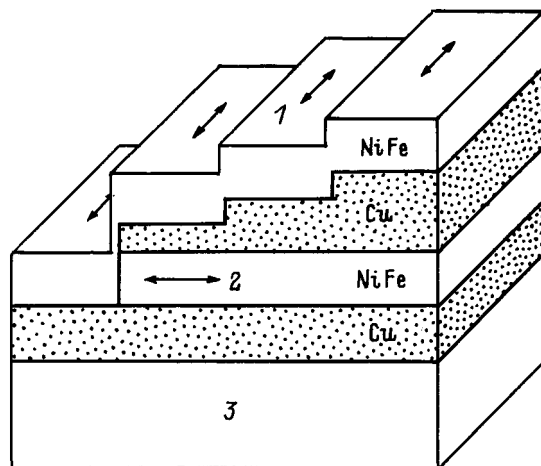


Рис. 1. Схема образца. Стрелками показаны направления осей легкого намагничивания (ОЛН₁ (2) и ОЛН₂ (1)) нижнего и верхнего слоев пермаллой соответственно; 3 — стекло.

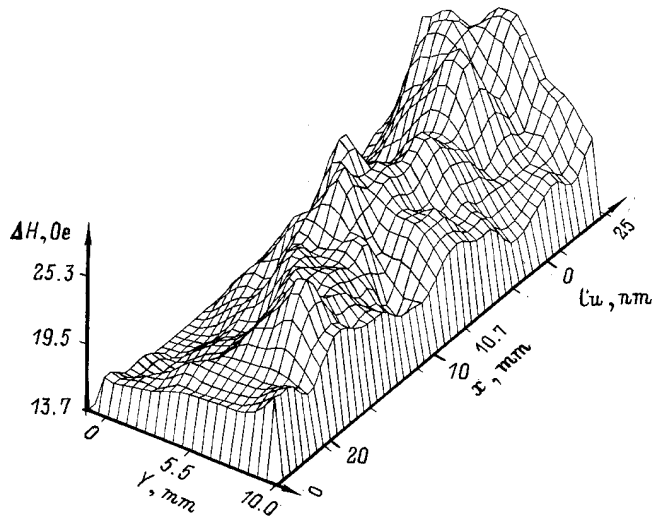


Рис. 2. Распределение значения ширины линии низкочастотного ферромагнитного резонанса на площади образца Cu-FeNi. По осям x и y отложены резонансные координаты образца.

перпендикулярной направлению струи пара. В настоящее время возобновляется интерес к проблемам наклонного напыления [7]. Это связано главным образом с тем, что величина поля анизотропии при наклонном напылении может существенно превосходить величину поля анизотропии, сформированной за счет наложения при напылении внешнего магнитного поля. При этом поле анизотропии тем больше, чем меньше скорость осаждения [7] и немонотонным образом зависит от угла падения. В нашем случае угол падения пучка на подложку составлял 15° .

На рис. 1 схематически показана структура образцов. На подложку осаждался слой меди толщиной ~ 20 nm, напылялся слой пермаллоя толщиной $d_1 \sim 10$ nm при косом падении атомного пучка, затем слой меди со ступенчато изменяющейся толщиной и снова слой пермаллоя толщиной $d_2 \sim 10$ nm. Перед осаждением второго слоя пермаллоя подложка поворачивалась на 90° . Таким образом, направление оси легкого намагничивания во втором слое пермаллоя должно составлять угол 90° с направлением оси легкого намагничивания первого слоя. Для контроля была также изготовлена пленка с одинаковой ориентацией осей легкого намагничивания в обоих слоях пермаллоя. Толщина промежуточного слоя Cu изменялась в пределах от 1.5 до 30 nm. Перед измерением образцы разрезались на участки с одинаковой толщиной промежуточного слоя Cu по визуально наблюдаемым границам.

Степень однородности магнитных свойств на исследуемых образцах в зависимости от толщины подслоя Cu контролировалась на установке сверхвысокочастотного (1 GHz) ферромагнитного резонанса (ФМР) с высоким пространственным разрешением [8] при наложении постоянного и высокочастотного полей в плоскости образцов. Измерения проводились на участках диаметром

1 mm при сканировании по площади 46×46 mm. На рис. 2 показано распределение значений ширины линии ФМР по площади образца для пленки пермаллоя, осажденной на слой Cu, толщина которого ступенчато возрастает по мере уменьшения x . Оптимальная величина подслоя Cu составляла ~ 20 nm. Интегральные параметры ФМР на частоте 9 GHz в зависимости от толщины промежуточного слоя Cu измерялись для двух взаимно перпендикулярных ориентаций образцов относительно направления постоянного поля. Петли гистерезиса при перемагничивании образцов в плоскости записывались на гистерезисографе, прототип которого описан в [9]. При этом образец можно было поворачивать на любой угол относительно направления перемагничивающего поля. Фарадеевское вращение (ФВ) измерялось в нормальной геометрии в поле насыщения, которое составляло ~ 7 kOe, в спектральном интервале 500–1000 nm с использованием модуляции состояния поляризации светового луча. Точность измерения угла ФВ составляла ± 0.2 min.

Однослойные пленки пермаллоя с подслоем Cu толщиной ~ 20 nm характеризовались идеально прямоугольными петлями гистерезиса. Ось легкого намагничивания была перпендикулярна направлению падения атомного пучка на подложку. Коэрцитивная сила H_C

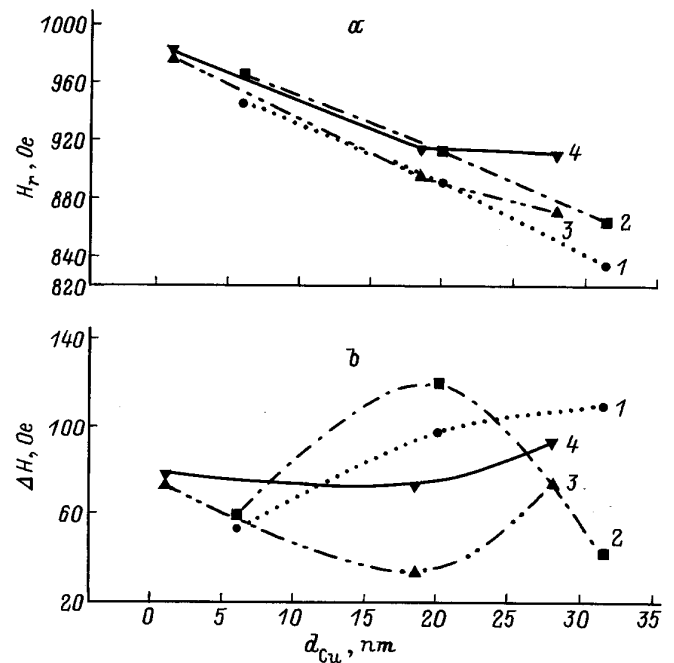


Рис. 3. Зависимость резонансного поля (a) и ширины линии (b) ферромагнитного резонанса на частоте 9 GHz от толщины промежуточного слоя Cu. Две серии образцов: 1, 2 — со взаимно перпендикулярной ориентацией осей легкого намагничивания; 3, 4 — с параллельной ориентацией осей легкого намагничивания в слое FeNi при наложении внешнего намагничивающего поля вдоль оси легкого намагничивания верхнего слоя FeNi (1, 3) и перпендикулярно этой оси (2, 4). Образцы каждой серии получены на одной подложке (рис. 1) и затем разрезаны по визуально наблюдаемым линиям раздела между участками с различной толщиной промежуточного слоя Cu.

Петли гистерезиса при перемагничивании образцов в двух направлениях, параллельном и перпендикулярном оси легкого намагничивания 2-го слоя пермаллой (рис. 1).

№ образца	Пермаллой		Cu d_{Cu} , nm	Петли гистерезиса	
	d_1 , nm	d_2 , nm		$H \parallel \text{ОЛН}_2$	$H \perp \text{ОЛН}_2$
1		7.5	14.5		
2	12	8.0	5.5		
3	15.0	9.0	15.0		
4	9.0	9.5	20.0		
5	15.0	9.0	22.0		
6	9.0	9.5	31.0		
7	6.6	8.6	28		
8	Теоретические петли гистерезиса для случая $H_{k1} = H_{k2} > H_{c1} = H_{c2}$				

П р и м е ч а н и е. Номера образцов соответствуют: 1 — только один слой пермаллой, 2–6 — два слоя пермаллой с перпендикулярной ориентацией осей легкого намагничивания, 7 — два слоя с параллельной ориентацией осей легкого намагничивания; d_{Cu} — толщина промежуточного слоя Cu.

составляла 2–4 Ое, поле анизотропии H_K превышало H_C приблизительно вдвое. Типичные для этого случая петли приведены в строке 1 таблицы. В пленках со взаимно перпендикулярной ориентацией осей анизотропии ОЛН₁ и ОЛН₂ в нижнем и верхнем слоях пермаллой соответственно вид петель гистерезиса зависел от толщины промежуточного слоя меди d_{Cu} . При $d_{Cu} > 20$ nm петли выглядели как сумма петель гистерезиса двух слоев, перемагничивающихся независимо друг от друга в соответствии с направлением магнитного поля относительно их осей легкого намагничивания ОЛН₁ и ОЛН₂ (строки 5 и 6 в таблице) в полном соответствии с теорией перемагничивания невзаимодействующих слоев путем однородного вращения вектора намагниченности

(строка 8 в таблице). Если перед осаждением второго слоя пермаллой подложка не поворачивалась, то оба слоя имели параллельные друг другу оси легкого намагничивания, о чем свидетельствует вид петель гистерезиса при повороте образца на 90° в поле перемагничивания (строка 7 в таблице). При уменьшении d_{Cu} ниже 20 nm характер петель гистерезиса свидетельствуют о влиянии магнитных слоев друг на друга. Это наблюдение противоречит данным [5], где отсутствие связи между слоями Fe–Ni наблюдалось при толщине медной прослойки, не превышающей 6 nm. Еще более неожиданной является зависимость параметров высокочастотного ФМР от толщины прослойки Cu. Как видно из рис. 3, а, величина резонансного поля H_r уменьшается более чем на 15% при

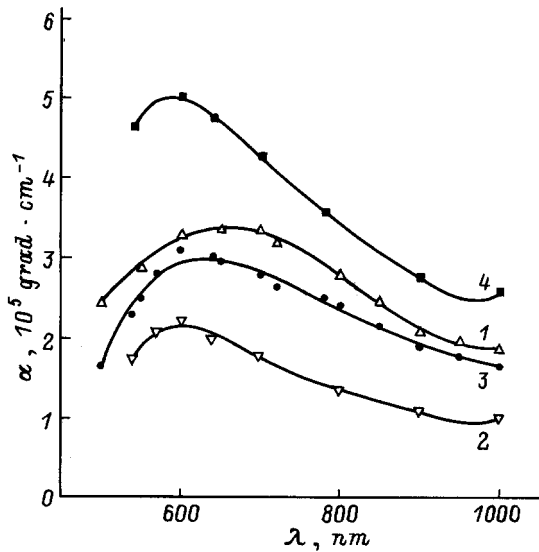


Рис. 4. Спектры фарадеевского вращения, снятые в нормальной геометрии в поле насыщения. 1 — один слой пермаллоя толщиной 9.5 nm на слое Cu толщиной 20 nm; 2, 3 — образцы 7 и 4 из таблицы соответственно; 4 — $d_1 = 4.5$ nm, $d_2 = 4.0$ nm, $d_{Cu} = 22$ nm, толщина подслоя Cu = 18 nm.

возрастании d_{Cu} как для образцов с перпендикулярной, так и для образцов с параллельной ориентацией осей анизотропии в слоях пермаллоя. Однако в первом случае H_r уменьшается практически линейно по d_{Cu} , а во втором это изменение замедляется при $d_{Cu} > 20$ nm. Кроме того, для образцов с параллельной ориентацией осей анизотропии величина H_r при намагничивании вдоль легкой оси (кривая 3) меньше, чем величина H_r при намагничивании поперек легкой оси (кривая 4) в соответствии с теорией и поведением однослойных анизотропных пленок. В случае же пленок с перпендикулярной ориентацией осей анизотропии любые два взаимно перпендикулярных направления намагничивания должны быть полностью эквивалентны. В действительности величины H_r для двух взаимно перпендикулярных направлений различны, относительная разность этих величин зависит от толщины d_{Cu} , а абсолютная разность тем больше, чем больше d_{Cu} . Ширина линии ФМР ΔH также сильно зависит от d_{Cu} , но в отличие от H_r эта зависимость немонотонна (рис. 3, б).

На рис. 4 приведены спектральные зависимости ФВ для ряда образцов. Видно, что включение в пленочную структуру меди приводит к одинаковому по характеру изменению спектров ФВ как для сэндвичей Cu–FeNi, так и для четырехслойных образцов Cu–FeNi–Cu–FeNi независимо от ориентации осей легкого намагничивания в плоскости: вблизи $\lambda = 600$ nm появляется широкий максимум. Точное положение максимума, ширина линии и величина вращения в максимуме немонотонным образом зависят от толщины слоев Cu. Такое изменение ФВ удовлетворительно описывается в рамках теории развитой в [10], где учитываются эффекты многократных отражений светового луча на границах между пленками различных металлов.

Выводы

Методом термовакуумного испарения в сверхвысоком вакууме получены структуры, включающие слои меди и пермаллоя с различной ориентацией осей легкого намагничивания. Обнаружено существенное влияние медных слоев на степень однородности магнитных свойств пермаллоя и изученные физические параметры пленок: петли гистерезиса, резонансное поле и ширину линии ФМР и спектры ФВ. Показано, что независимое перемагничивание слоев пермаллоя в структуре Cu–FeNi–Cu–FeNi имеет место при толщине промежуточного слоя Cu, превышающей 20 nm. Показано, что поле однородного ФМР такой структуры на частоте 9 GHz убывает практически линейно с возрастанием толщины промежуточного слоя меди даже при таких толщинах d_{Cu} , когда в квазистатическом режиме перемагничивание слоев пермаллоя осуществляется независимо друг от друга. Ширина линии ФМР и величина ФВ в спектральном максимуме немонотонным образом зависят от толщины слоев меди.

Авторы признательны Б.А. Беляеву за проведение измерений ФМР с локальных участков образцов.

Работа частично поддержана Международным научным фондом и правительством России, грант № RKS300.

Список литературы

- [1] Qiu Z.Q., Pearson J., Berger A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68. P. 1398–1399.
- [2] Qiu Z.Q., Pearson J., Bader S.D. // Phys. Rev. 1992. Vol. 46B. P. 8659–8660.
- [3] Qiu Z.Q., Pearson J., Bader S.D. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73. P. 5765–5770.
- [4] Rijks Th.G.S.M., Coehoorn R., Daemen J.T.F. et al. // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. P. 1092–1099.
- [5] Bauer M., Matner M., Hoffmann H. // J. Magn. Magn. Mater. 1995. Vol. 148. P. 319–320.
- [6] Smith D.O., Cohen M.S., Weiss G.P. // J. Appl. Phys. 1960. Vol. 30. P. 1755–1771.
- [7] Itoh K., Hara K., Kamiya M. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 1995. Vol. 148. P. 132–133.
- [8] Беляев Б.А., Иваненко А.А., Лексиков А.А. и др. // Препринт ИФ СО РАН. № 761Ф. Красноярск, 1995. 59 с.
- [9] Кобелев В.В. // ФММ. 1962. Т. 13. С. 467–470.
- [10] Маевский В.М. // ФММ. 1985. Т. 59. С. 213–219.