ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ И РЯБИ НАМАГНИЧЕН-НОСТИ ОБМЕННОСВЯЗАННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК

я. м. погосян, м. а. чалабян

Методом лоренцевой электронной микроскопии исследуются структура доменных границ и рябь намагниченности вакуумноосажденных двухслойных пленок пермаллой—кобальт. Показано, что при суммарной толщине пленок до 800Å перемагничивающая граница в этих пленках является границей с поперечными связями, а поведение ряби намагниченности описывается микромагнитной теорией Гоффмана.

Введение

Преимущество многослойных ферромагнитных пленок перед однослойными заключается в том, что вариацией толщины отдельных слоев можно получать различные магнитные характеристики при одной и той же суммарной толщине пленок [1, 2]. Благодаря ряду специфических свойств этот класс пленок в настоящее время находит широкое применение в вычислительной технике в качестве элементов памяти без разрушения информации при считывании, в логических устройствах и т. д. [2—4]. Хотя исследованию физических явлений в обменносвязанных пленках посвящено большое число работ и выявлены общие закономерности поведения поля анизогропии и коэрцитивной силы в зависимости от толщины и магнитных характеристик отдельных слоев, в литературе отсутствуют какие-либо сведения о возможной применимости микромагнитной теории ряби намагниченности к этому классу пленок. Нам известна лишь одна работа [5], где делается только предположение о возможном вкладе ряби намагниченности при взаимодействии между магнитожесткой и мягкой слоями.

Настоящая работа предпринята с целью исследования структуры доменных границ и поведения ряби намагниченности в обменносвязанных двухслойных пленках пермаллой—кобальт.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Обменносвязанные двухслойные пленки типа пермаллой—кобальт, предназначенные для электронномикроскопических исследований, получались методом вакуумной конденсации на покровных стеклах микроскопа, предварительно покрытых тонким слоем каменной соли. Сначала осаждалась магнитомягкая компонента в своем обычном режиме, а затем магнитожесткий слой. Во избежание возможной диффузии атомов кобальта в пермаллой конденсация магнитожесткого слоя проводилась при комнатной температуре подложки. Конструкция вакуумной установки позволяла получать серию пленок с одинаковой толщиной слоя пермаллоя, но с различной толщиной слоя кобальта (в том числе и со слоем кобальта нулевой толщины). Толщина магнитомягкого слоя составляла величину порядка 500 Å, а толщина магнитожестких слоев — соответственно ~ 50, 100 и 150 Å. Исследование магнитной стоуктуры пленок проводилось с помошью электронного микооскопа типа УЭМВ-100К [6].

Лоренциикроскопические исследования магнитомягкого слоя показали. что, как и следовало ожидать, при данной толщине перемагничивающая граница является границей с поперечными связями (см. рис. 1а). В случае же обменноссязанных двухслойных пленок в вышеуказанном интеовале толщин перемагничивающая граница является общей для обоих слоев и также поедставляет собой гоаницу с поперечными связями (см. рис. 16-г).



Рис. 1. Лоренцмикроскопическое изображение доменных границ: a) Ni/Fe 500 Å; 6) Ni/Fe 500 Å+ Co 50 Å; e) Ni/Fe 500 Å + + Co 100 Å; 1) Ni/Fe 500 Å + Co 150 Å.

ALCONDO STORA

Из рисунка видно также, что с увеличением толщины магнитожесткого слоя плотность поперечных связей растет.

Отметим, что изображения, аналогичные рис. 1, наблюдались в работе [7] в случае однослойных пленок, где приложением к пленке растягивающих напряжений изменялась константа одноосной анизотропии (К"). Согласно [7] среднсе расстояние между соседними крестообразными линиями Блоха (l) обратно пропорционально K_n. С физической точки зрения это можно понять, если исходить из того факта, что угол отклонения (β) 843-4

вектора намагниченности от оси легкого намагничивания (ОЛН) вблизи крестообразной линии при равновесном состоянии границы должен быть постоянным. Естественно, рост h_u вызовет уменьшение размеров областей вблизи границы, где векторы намагниченности отклонены от ОЛН. Это приведет к увеличению плотности энергии неелевских сегментов и уменьшению плотности энергии поперечных связей, т. е. к нарушению равновесия и росту энергии такой системы. Требование постоянства угла β , соответствующего равновесию границы с поперечными связями, вызовет сокращение расстояния между соседними поперечными связями. Это следует также из выражения [8]

$$tg\beta = 1 - \frac{K_u l}{N l_s^2 \delta},\tag{1}$$

где $N = 4\pi d/(d + \delta)$ — размагничивающий фактор неелевской границы, l_s — намагниченность насыщения, δ — ширина границы и d — толщина пленки. Действительно, если принять, что $Nl_s^2\delta$ = const, то при изменении K_u угол β может оставаться постоянным при соответствующем уменьшении l.

Здесь нам хотелось бы особо остановиться на рис. 12. Из рисунка отчетливо не видно, что имеется гоаница с поперечными связями: тонкие светлые линии, пересекающие границу, можно принять за рябь намагниченности, так как расстояния между ними сравнимы со средней длиной волны ояби намагниченности данной пленки. Может показаться, что здесь уже имеется блоховская граница, а возможно даже граница Блоха с неелевскими линиями [9], что свойственно пермаллоевым пленкам большой толщины. На возможное существование границы Блоха с линиями Нееля указывает микроснимок, приведенный на рис. 2а и представляющий собой изображение конвергирующей границы при большом расфокусировании двухслойной пленки с толщиной кобальта ~ 150Å. Судя по рисунку можно утверждать, что протяженность неелевских и блоховских участков сравнима. Аналогичное изображение границы с поперечными связями было получено в работе [10] в пленках никеля с перпендикулярной анизотропией 106 эрг/см³ и толщиной 600 Å. В действительности здесь мы имеем обычную границу с поперечными связями. На это указывает изображение этой же границы, полученное при высоком разрешении (см. рис. 26, полученный в электронном микроскопе JEM-100U). Если принять, что диаметр блоховской линии порядка 100 Å [11], то судя по изображению границы нельзя утверждать, что размеры неелевских и блоховских участков сравнимы. Факт существования границы с поперечными связями с $l \sim 0.3$ мкм сам по себе представляет интерес и в какой-то мере подтверждает наши ранние предположения о существовании в толстых пленках двумерной границы [12].

На рис. 3 приводится зависимость среднего расстояния *l* между соседними поперечными связями от обратной величины поля анизотропии исследуемых обменносвязанных пленок. Поле анизотропии измерялось непосредственно в электронном микроскопе по повороту вектора намагничен-



Рис. 2. а) Изображение структуры границы пленки Ni/Fe 500 Å + Co 150 Å, полученное при большой степени расфокусировки; б) структура этой же границы, полученная при высоком разрешении.



Рис. 3. Зависимость среднего расстояния между соседними крестообразными линиями Блоха от обратной величины поля анизотропии (нумерация экспериментальных точек на графике соответствует изображениям, приведенным на рис. 1).

ности от ОЛН под действием поля H_r , приложенного по оси трудного намагничивания (ОТН). Видно, что аналогично [7] эта зависимость представляет собой прямую линию, что указывает на сходство с зависимостью l от H_k , найденной для однослойных пленок. Отклонение точки 4 на графике, по-видимому, обусловлено эффектом роста суммарной толщины исгледуемой пленки. Согласно микромагнитной теории Гоффмана [13, 14], длина волны ряби намагниченности во внешнем поле H_a описывается формулой

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{A}{K_u} \left(\frac{1}{1 \pm H_s/H_u}\right)^{1/2}},$$
(2)

где A — константа обменного взаимодействия, а знаки (±) указывают на полярность приложенного поля. В случае однослойных пленок пермаллоя по изменению длины волны ряби намагниченности под действием поля H_{z} при известных величинах A и K_u можно с достаточной точностью оденить величину H_b .

Аналогичные исследования нами были проведены с обменносвязанными пленками. В отличие от обычных однослойных пленок оценка величины H_s здесь делалась на основе выражения

$$\lambda_i = \lambda_0 \left(1 + H_{\rm al} / H_{\rm c} \right)^{-1/2},\tag{3}$$

где λ_0 — длина волны ряби намагниченности в отсутствие поля H_a . На рис. 4 приводится график зависимости λ_i от $H_{a,i}$, где в качестве параметра взята толщина магнитожесткого слоя кобальта. Здесь точки соответствуют экспериментальным данным, а сплошные линии получены об-



Рис. 4. Изменение длины волны ряби намагниченности в обменносвязанных пленках от энешнего поля H_a ; в качестве параметра взята толщина магнитожесткого слоя (нумерация кривых соответствует изображениям, приведенным на рис. 1).

работкой экспериментальных данных методом наименьших квадоатов. Как видно из гозфика, наблюдается тенденция к уменьшению длины волны ояби намагниченности с увеличением толщины магнитожесткого слоя. В таблице для сравнения приводятся усредненные значения величины Н., най-

Таблица

- Tan algudeling y the super testament testament (1988 - 111, gebruitungen	Ni/Fe 500 Å	Ni/Fe 500 Å + Co 50 Å	Nt/Fe 500 Å + Co 100 Å	N1/Fe 500 Å + Co 150 Å
H _k (s) Поворот I _s	4	8.95	9,5	11,2
H _k (s) Рябь I _s	3,4	11,3	11,35	12,15

денные по углу поворота вектора намагниченности от ОЛН под действием поля Н - и из коивых, поиведенных на рис. 4. Максимальная относительная ошнбка измерений поля анизотропии в первом методе составляет 8%, а во втором - 20%. Отсюда следует, что в пределах экспериментальной точности величины Н собменносвязанных пленок, полученные обоими методами, находятся в удовлетворительном согласии, что указывает на применимость микромагнитной теории Гоффмана к рассматриваемым пленкам.

Ереванский государственный

УНИВЕРСИТЕТ ПОСТУПИЛА 28.VI.1977

ΛИТЕРАТУРА

- 1. W. Andrā. Czechoslovak J. of Phys., B21, 522 (1971).
- T. S. Crowther. IEEE Trans. Magn., Mag-4, 529 (1968).
 W. H. Metklejohn. J. Appl. Phys. Suppl., 33, 1328 (1962).
- 4. А. А. Глазер и др. Физика магнитных пленок, Материалы Международного симпознума по физике магнитных пленок, Иркутск , 1968, стр. 190.
- 5. Х. Э. Валастэ. Автореферат кандидатской диссертации, МГУ, 1977.
- 6. Я. М. Погосян, Т. А. Погосян, К. В. Авакян. Заводская лаборатория, 36, 362 (1970).
- 7. S. Middelhoek. J. Appl. Phys., 34, 1054 (1963).
- 8. А. С. Сигов, А. Г. Шишков. ФММ, 31, 731 (1971).
- 9. K. U. Stein, E. Feldtkeller. J. Appl. Phys., 38, 440 (1967).
- 10. В. П. Карабанова, Г. В. Антипьев. Физика магнитных пленок, Материалы Семинара по физике магнитных явлений, Иркутск, 1975, стр. 126.
- 11. P. Oischik. Phys. Stat. Sol. (a), 5, 183 (1971).
- 12. Я. М. Погосян, С. А. Арутюнян. ФММ, 36, 270 (1973).
- 13. H. Hoffman. Phys. Kond. Materie, 2, 32 (1964).
- 14. H. Hoffman. J. Appl. Phys., 35, 1790 (1964).

ԴՈՄԵՆԱՅԻՆ ՍԱՀՄԱՆՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԵՎ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆՈՒԹՑԱՆ ՎԵԿՏՈՐԻ ԾՓԱՆՔԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՄԱՆՐԱԴԻՏԱԿԱՅԻՆ ՀԵՏԱՉՈՏՈՒՄԸ ԾԱՎԱԼԱՓՈԽԱՆԱԿԱՅԻՆ ԿԱՊՈՎ ԵՐԿՇԵՐՏ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐՈՒՄ

Sm. U. ANANUSUL, U. U. QULLASUL

Լորննցյան էլեկտրոնային միկրոսկոպիայի մենեոդով Տետազոտվում է դոմենային սամմանների կառուցվածքը և մագնիսականունյան վեկտորի ծփանքը վակուումում ստացված պերմալոյ-կորալտ տիպի երկչերտ Թաղանβներում։ Ցույց է տված, որ Բաղանβների մինչև 800Å ընդՀանուր Հաստունյան դեպքում վերամագնիսացնող սամմանն այդ Թաղանβներում իրենից ներկայացնում է խաչաձև գծերով սամման, իսկ մագնիսականունյան վեկտորի ծփանքի վարքը նկարագրվում է Հոֆմանի միկրոմագնիսական տեսունյամը։

ELECTRONMICROSCOPIC STUDY OF THE STRUCTURE OF DOMAIN WALLS AND NAGNETIZATION RIPPLE IN THE EXCHANGE COUPLED DOUBLE LAYER FILMS

Ya. M. POGOSYAN, M. A. CHALABYAN

The structure of domain walls and the magnetization ripple in vacuum deposited permalloy-cobalt films was studied by means of Lorentz-microscopic method. It is shown, that the domain walls in the films with total thickness less that 800 Å are of crosstie type, and the behaviour of the magnetization ripple is described by the Hoffmann theory.