

Многоуровневое межслойное взаимодействие в слоистых пленочных структурах

© В.О. Васьяковский, П.А. Савин, В.Н. Лепаловский, А.А. Рязанцев

Уральский государственный университет,
620083 Екатеринбург, Россия

(Поступила в Редакцию 29 апреля 1997 г.)

Выполнен анализ возможных механизмов межслойного магнитного взаимодействия в пленочных сэндвичах. В основу исследования положено предположение о существенном влиянии межслойной связи на гистерезисные свойства пленок. Оно в свою очередь базируется на экспериментальных данных по коэрцитивной силе, параметрам доменной структуры и микроструктуры пленок $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cr}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$, $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}/\text{Cr}/\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$. С использованием теоретических оценок показано, что с ростом толщины прослойки Cr обменное взаимодействие между ферромагнитными слоями может сменяться магнитостатическим, эффективность которого определяется наличием неровностей поверхностей и "ряби намагниченности" слоев.

Многослойные магнитные пленки обладают рядом специфических особенностей магнитных, магнитооптических, магниторезистивных и других свойств, которые вызывают активный исследовательский интерес. В том числе известно, что в системе магнитных слоев, разделенных немагнитными прослойками, наблюдается существенно меньшая коэрцитивная сила H_c , чем в однослойных пленках. Это связывается с нарушением межслойного обменного взаимодействия и определенным конфигурированием доменных границ. Неелевские доменные границы, находящиеся в разных слоях, образуют структуры с частично замкнутым магнитным потоком. В результате происходит снижение плотности энергии таких границ и как следствие уменьшение H_c [1]. Однако наряду с этим в формировании гистерезисных свойств пленок могут играть роль и другие механизмы межслойного взаимодействия, изучению которых посвящена данная работа.

Отправной точкой данного исследования явились зависимости коэрцитивной силы двухслойных магнитных пленок от толщины L немагнитных прослоек. Оказалось, что с увеличением L упоминавшееся выше резкое снижение H_c , которое происходит при $L \sim 10 \text{ \AA}$, довольно неожиданно сменяется быстрым возрастанием коэрцитивной силы. Это хорошо видно из рис. 1, на котором показаны зависимости $H_c(L)$ для слабомагнотриксционных пленок $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ и $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$ с прослойкой хрома. По мере увеличения толщины прослойки ($L > 40 \text{ \AA}$) рост коэрцитивной силы замедляется, и значения H_c , свойственные однослойным пленкам (1 и 2.4 Oe для $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ и $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$ соответственно), реализуются только при $L > 1000 \text{ \AA}$.

Эксперимент, результаты которого представлены на рис. 1, был выполнен на образцах, полученных методом высокочастотного ионного распыления. При его постановке принимались меры по снижению общего уровня коэрцитивной силы пленок и созданию условий для выявления деталей ее изменения. Подложками служили термоокисленные монокристаллические пластины крем-

ния, покрытые нитридом титана. Подслоем TiN, по нашим данным [2], способствует образованию более однородной микроструктуры в магнитных слоях. В качестве материала прослойки использовался хром, который не несет результирующей намагниченности и отличается относительно слабым влиянием на гистерезисные свойства прилегающих магнитных слоев [3]. Выбор составов самих магнитных слоев был также обусловлен стремлением снизить вклад в коэрцитивную силу от возможных неоднородных упругих напряжений.

Толщина каждого из магнитных слоев была фиксирована и составляла 150 \AA . Температура подложек в процессе осаждения пленок поддерживалась равной 200°C . Присутствие при напылении однородного магнитного поля задавало в плоскости образцов одноосную магнитную анизотропию. Значения коэрцитивной силы

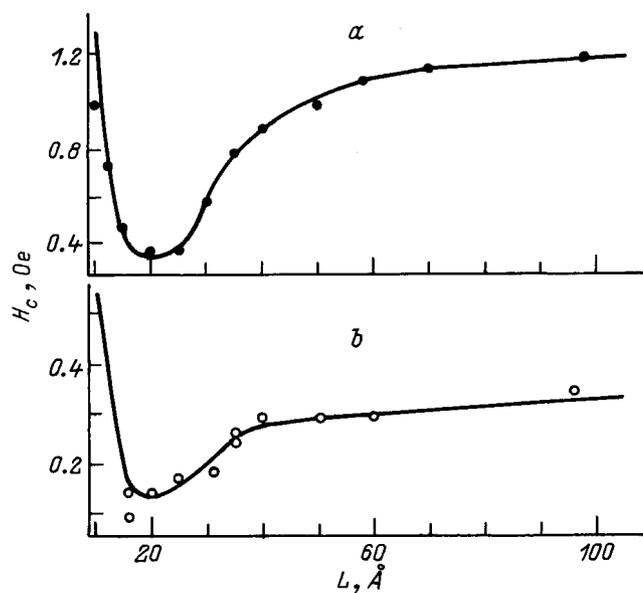


Рис. 1. Зависимости коэрцитивной силы пленок $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cr}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ (a) и $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}/\text{Cr}/\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$ (b) от толщины прослойки хрома.

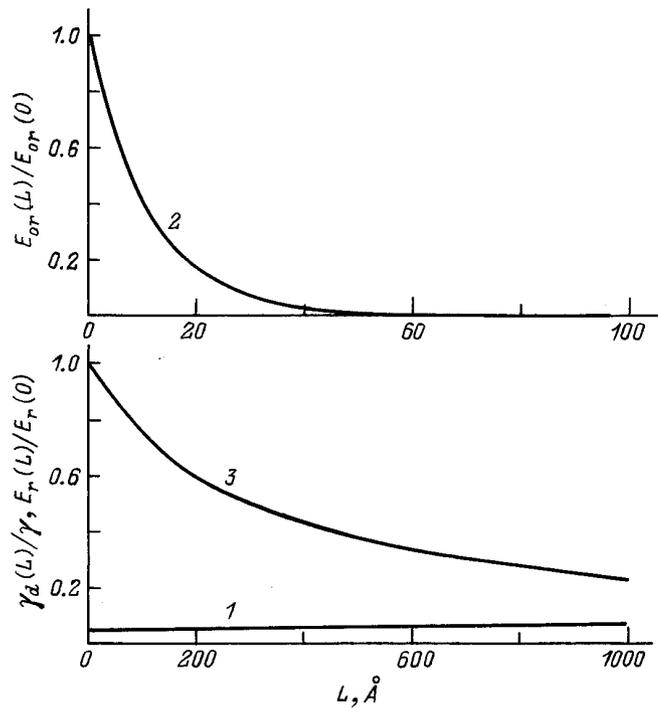


Рис. 2. Нормированные зависимости энергии свдвоенных доменных границ (1), энергии взаимодействия слоев по механизму "апельсиновой кожуры" (2) и через "рябь намагниченности" (3) от толщины немагнитной прослойки.

определялись из магнитооптических петель гистерезиса, измеренных вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН).

Одной из причин возрастания коэрцитивной силы при $L > 20 \text{ \AA}$ может быть увеличение плотности энергии γ_d и уменьшение ширины δ связанных доменных границ за счет магнитоэлектростатической составляющей. Соответствующие оценки были выполнены нами с использованием формулы, предложенной в [4],

$$\gamma_d = \frac{A\pi^2}{\delta} + \frac{K\delta}{2} + \frac{M_s^2\delta D}{(\delta + 2D)^2}(D + 3L/2), \quad (1)$$

где A — параметр обменного взаимодействия, K — константа магнитной анизотропии, M_s — намагниченность насыщения, D — толщина магнитного слоя.

На рис. 2 (кривая 1) показана в приведенных единицах зависимость $\gamma_d(L)$ в двухслойных пленках $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$ с $A = 10^{-6} \text{ erg/m}$, $K = 10^4 \text{ erg/m}^3$, $M_s = 10^3 \text{ G}$, $D = 150 \text{ \AA}$. Нормирование осуществлено на плотность энергии неелевской доменной границы γ , которая вычислена по [5] для однослойной пленки толщиной 300 \AA . Видно, что в области толщин прослойки $10\text{--}50 \text{ \AA}$ γ_d изменяется очень слабо. В то же время коэрцитивная сила повышается в 2–3 раза, т.е. несравненно сильнее, чем это могло бы быть обусловлено ходом $\gamma_d(L)$.

Альтернативное объяснение рассматриваемой особенности гистерезисных свойств может состоять в следующем. Пары доменных границ с пониженной магнитоэлектростатической энергией образуются с большей вероятностью,

если между слоями существует положительная связь по всей поверхности. Она может иметь магнитную природу и быть более дальнедействующей, чем обменная связь, которая, по-видимому, теряет доминирующий характер при $L > 10 \text{ \AA}$. С ростом толщины прослойки магнитное взаимодействие постепенно ослабевает, что приводит к появлению несдвоенных доменных границ, возрастанию усредненной граничной энергии и увеличению H_c .

Изложенная концепция косвенно подтверждается при анализе картин доменной структуры, полученных с помощью электронного микроскопа. Для пленок, содержащих магнитные слои $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$, они показаны на рис. 3. Соответствующие образцы были приготовлены по описанной выше технологии на кристаллах NaCl. Перед наблюдениями они отделялись от подложки и размагничивались переменным магнитным полем, приложенным перпендикулярно ОЛН.

На представленных фотографиях доменные границы выглядят как черные или белые линии. Исходя из особенностей формирования изображения в электронном микроскопе, можно заключить, что закономерное чередование черного и белого цветов и большая яркость доменных границ на рис. 3,а указывают на сквозной характер доменов в образцах с малой L . При толщинах прослойки несколько более 20 \AA регулярность смены цвета соседних границ нарушается, а яркость некоторых из них уменьшается (рис. 3,б). Это свидетельствует о появлении нескольких доменов и не связанных в пары доменных границ именно в той области L , в которой начинается возрастание H_c .

В образцах с еще более толстой прослойкой наблюдаются слабоконтрастные границы—"призраки" (на рис. 3,с такие границы отмечены стрелками). Это отражает ситуацию, в которой прослойка и доменные границы, находящиеся одна над другой в разных слоях, разделяют домены с антипараллельной намагниченностью. При такой магнитной конфигурации граница в одном слое имеет черный, а в другом слое — белый цвет. Наложение их изображений делает свдвоенную границу в целом малозаметной. Присутствие границ—"призраков" указывает на существование несквозных доменов на достаточно большой площади.

Таким образом, предположение о корреляции между гистерезисными свойствами и межслойной связью представляется вполне оправданным. Это позволяет рассматривать коэрцитивную силу как своего рода индикатор величины взаимодействия слоев и использовать ее для оценки эффективности соответствующих механизмов. К таковым, в частности, относится так называемый механизм "апельсиновой кожуры". Он вводит связь между слоями через магнитные поля рассеяния, создаваемые неровностями поверхностей. В работе [6] в предположениях гармонического характера и синхфазности поверхностных неровностей получено аналитическое выражение для энергии взаимодействия слоев

$$E_{or} = -\frac{\pi p}{2\sqrt{2}} h_1 h_2 M_1 M_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \exp(-pL\sqrt{2}). \quad (2)$$

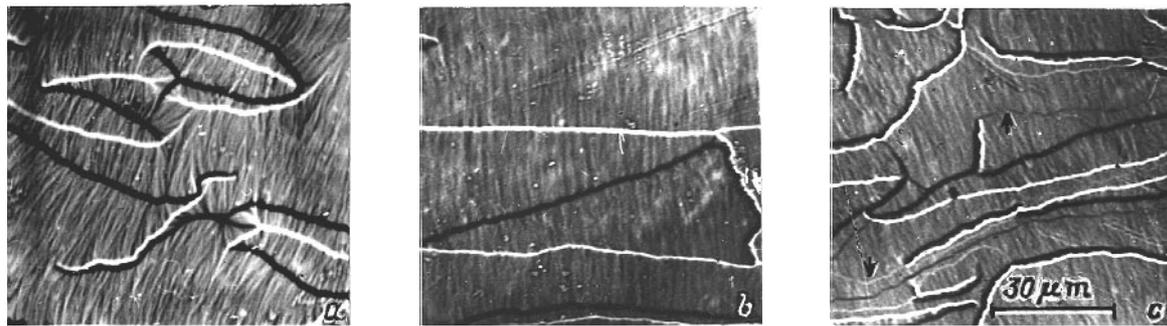


Рис. 3. Электронно-микроскопические картины доменной структуры сэндвичей $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65} / \text{Cr} / \text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$ с разной толщиной прослойки хрома. L (Å): $a - 8$, $b - 25$, $c - 40$.

Здесь M_1 и M_2 — намагниченности слоев, $(\alpha_1 - \alpha_2)$ — угол между векторами намагниченности, h_1 и h_2 — амплитуды волн неровностей, $p = 2\pi/\lambda_{\text{ор}}$ ($\lambda_{\text{ор}}$ — длина волн неровностей). Данная формула и более строгий численный расчет [7] дают близкие результаты, если толщины магнитных слоев превышают амплитуды неровностей более чем в 5 раз. С учетом оценочного характера того и иного подхода использование аналитического выражения представляется более рациональным.

На рис. 2 (кривая 2) показана в приведенных единицах зависимость $E_{\text{ор}}(L)$, вычисленная по (2) для двухслойных пленок $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$ со следующими параметрами: $M_1 = M_2 = 10^3 \text{ G}$, $\alpha_1 - \alpha_2 = 0$, $\lambda_{\text{ор}} = 100 \text{ Å}$, $h_1 = h_2 = 10 \text{ Å}$. Длина волны неровностей была принята равной удвоенному среднему размеру кристаллитов d , который определялся с помощью электронного микроскопа, а амплитуда неровностей — равной десятой части от $\lambda_{\text{ор}}$. В последнем случае мы ориентировались на данные экспериментального исследования рельефа поверхности пленок пермаллоя, выполненного в [8].

Результаты расчета указывают на сильное изменение энергии взаимодействия слоев в области малых толщин прослоек. В частности, в интервале $20 < L < 40 \text{ Å}$ эффективность межслойной связи по механизму "апельсиновой кожуры" снижается в несколько раз. Возвращаясь к рис. 1, отметим, что в указанном диапазоне L имеет место и сравнительно резкое увеличение H_c . Установленная таким образом корреляция позволяет рассматривать неровности поверхностей пленок как один из наиболее вероятных источников межслойного магнито-статического взаимодействия.

Изменения коэрцитивной силы двухслойных пленок не исчерпываются областью малых толщин прослоек. Монотонный рост H_c продолжается при $L > 50 \text{ Å}$. Однако для его объяснения требуется привлечение нового механизма межслойной связи, поскольку изменения γ_d и $E_{\text{ор}}$ в области $50 < L < 500 \text{ Å}$ незначительны. Основой такого механизма может быть тонкая магнитная структура ("ряби намагниченности") пленок. Она представляет собой малые периодические отклонения намагниченности от своего среднего положения. На микрофотографиях, показанных на рис. 3 "ряби намагниченности" выглядят

как слабоконтрастное изменение интенсивности электронного пучка внутри доменов. Мы предположили, что тонкая структура является источником магнитных полей рассеяния, поскольку в поликристаллических пленках ориентация намагниченности от кристаллита к кристаллиту может изменяться дискретно из-за ослабленного обменного взаимодействия на междолинных границах.

Вычисление энергии связи слоев по предлагаемому механизму (E_r) было выполнено нами численно. При этом тонкая магнитная структура каждого слоя представлялась как система полос одинаковой намагниченности, расположенных перпендикулярно ОЛН. Ширина полос отождествлялась со средним размером кристаллитов d . Угол α , характеризующий отклонение намагниченности от ОЛН, на границе полос изменялся дискретно. Однако в целом колебания намагниченности вдоль ОЛН считались гармоническими с длиной волны λ_r .

Расчет проводился на основе выражения, описывающего взаимодействие двух точечных магнитных диполей. Для этого полосы равной намагниченности разбивались на элементы в форме параллелепипедов с основанием $d \times d$ и высотой, совпадающей с толщиной слоя D . Каждому элементу приписывался магнитный момент, равный произведению его объема на намагниченность и расположенный в центре элемента. По парам элементов из разных слоев осуществлялось суммирование. Максимальное расстояние между элементами ограничивалось величиной D^3 . Энергия взаимодействия относилась к единице поверхности образца. Для уменьшения погрешности, обусловленной грубостью модели точечных диполей, за конечный результат принималась разность значений, вычисленных для двух состояний. При одинаковых геометрических параметрах одно из них характеризовалось наличием, а другое отсутствием ($\alpha = 0$) "ряби намагниченности".

Зависимость нормированной энергии E_r от толщины прослойки для пленок, содержащих слой $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}$, показана на рис. 2 (кривая 3). Она получена при условии равенства параметров и синхфазности "ряби намагниченности" в слоях пленки, $d = 50 \text{ Å}$ и $\lambda_r = 1 \mu\text{m}$. Оценка длины волны ряби λ_r была сделана по микро-

фотографиям доменной структуры (рис. 3). Кривая $E_r(L)$, как и зависимость $E_{ор}(L)$, носит экспоненциальный характер. Однако изменение E_r с ростом L происходит значительно медленнее, чем $E_{ор}$. Соответствующие характеристические длины составляют 600 и 13 Å. Таким образом, рассматриваемый механизм отличается сравнительно большим дальним действием и может определять зависимость $H_c(L)$ в области больших L . Следует также отметить, что нарушение синхфазности "ряби намагниченности" дает только небольшое (до 15%) уменьшение абсолютной величины энергии. В то же время нескоррелированность неровностей поверхности может привести к смене знака взаимодействия.

В целом изложенные результаты позволяют предложить следующую обобщающую модель. В многослойных магнитных пленках существует несколько механизмов межслойной связи: обменное взаимодействие, магнито-статическое взаимодействие по механизму "апельсиновой кожуры", магнито-статическое взаимодействие через "рябь намагниченности". Именно в такой последовательности изменяется их эффективность при увеличении расстояния между магнитными слоями. В совокупности с магнито-статическим взаимодействием доменных границ эти механизмы в значительной степени определяют гистерезисные свойства слоистых пленочных структур.

Авторы выражают благодарность И.Н. Кондратьеву и Н.Н. Щёголевой за содействие в работе.

Список литературы

- [1] H. Clow. Nature **194**, 1035 (1962).
- [2] V.N. Lepalovskij, V.O. Vas'kovskij. J. Magn. Magn. Mater. **160**, 343 (1996).
- [3] V.O. Vas'kovskij, V.N. Lepalovskiy, V.G. Muchametov, Yu.M. Yarmoshenko. J. Magn. Magn. Mater. **148**, 1–2, 325 (1995).
- [4] F.J. Friedlaender, L.F. Silva. IEEE Trans. Magn. **2**, 2, 135 (1966).
- [5] L. Neel. Comp. Rend. **241**, 533 (1955).
- [6] L. Neel. Comp. Rend. **255**, 1676 (1962).
- [7] E.W. Hill, S.L. Tomlinson, J.P. Li. J. Appl. Phys. **73**, 10, 5978 (1993).
- [8] E.W. Hill, J.P. Li, B.K. Birtwistle. J. Appl. Phys. **73**, 10, 6365 (1993).