

Статические свойства асимметричных вихреподобных доменных стенок в магнитно-одноосных пленках больших толщин

© Л.Г. Корзунин, Б.Н. Филиппов, Ф.А. Кассан-Оглы, И.А. Чайковский*

Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук,
629219 Екатеринбург, Россия
E-mail: filbor@imp.uran.ru

* Университет Бен-Гуриона Негевы,
84105 Беер-Шива, Израиль

(Поступила в Редакцию 2 ноября 2005 г.)

Путем численной минимизации полной энергии магнитно-одноосной пленки с осью легкого намагничивания, лежащей в ее плоскости, в рамках строгого микромагнитного подхода и двухмерной модели распределения намагниченности исследованы структура и энергия асимметричных вихреподобных блоховских и неелевских стенок. Исследования проведены в широкой области толщин b пленок (вплоть до $b = 1 \mu\text{m}$) и в широкой области изменения их магнитных параметров. Установлено, что наиболее универсальной структурой стенок в рассматриваемых пленках являются асимметричные вихреподобные стенки. Показано, что в отличие от магнитно-многоосных пленок асимметричные блоховские стенки всегда стабильны.

Работа выполнена в рамках Интеграционного проекта № 34 Уральского и Сибирского отделений РАН и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-02-17704 и 03-02-16185).

PACS: 75.60.CR, 75.70.Ak

1. Введение

Существование асимметричных вихреподобных доменных стенок в магнитно-мягких магнитно-одноосных пленках с осью легкого намагничивания, параллельной поверхности пленки (плоскостная анизотропия), было предсказано в работах [1] и [2]. Причина их образования связана с уменьшением энергии магнитостатического взаимодействия, которое в магнитно-мягких пленках играет важную роль по сравнению с ее ролью в пленках с большим фактором качества $Q > 1$ ($Q = K/2\pi M_s^2$, K — константа анизотропии, M_s — намагниченность насыщения). Точный учет этой энергии в рамках двухмерного распределения намагниченности стал возможен в связи с развитием вычислительной техники большой производительности. В настоящее время существование асимметричной вихреподобной структуры доменных стенок в пленках с плоскостной анизотропией подтверждено целым рядом экспериментальных исследований (см., например, [3–5]) на основе использования высоковольтной электронно-микроскопической техники.

Первоначально было предсказано существование двух типов асимметричных вихреподобных стенок: асимметричных стенок Блоха [1,2] и асимметричных стенок Нееля [2]. При исследованных условиях асимметричные неелевские стенки всегда были метастабильными. Было установлено также, что соответствующие стенки могут существовать как в магнитно-одноосных пленках с плоскостной анизотропией, так и в пленках с кубической анизотропией с разной ориентацией поверхности относительно кристаллографических осей [3–7]. Позже было показано [8], что в пленках с кубической анизотропией и госсовской ориентацией поверхности при достаточно больших толщинах ($\geq 250 \text{ nm}$ в пленках железа)

стабильными могут быть неелевские стенки с двумя асимметричными вихреподобными образованиями. Это связано с тем, что в пленках с госсовской ориентацией поверхности весьма важную роль начинают играть направления легкого намагничивания, расположенные под углом 45° и 135° по отношению к поверхности пленки. В результате намагниченность в стенке имеет тенденцию к ориентации вдоль указанных направлений, что приводит к невыгодности существования одновихревой асимметричной стенки Блоха [1], начиная с некоторых толщин пленок. Вместо такой стенки, как было показано в нашей работе [8], появляется трехвихревая асимметричная стенка, энергия которой оказывается несколько выше энергии асимметричной двухвихревой неелевской стенки. Таким образом, рассмотрение широкой области толщин пленок с кубической анизотропией привело к выявлению совершенно новых особенностей структуры доменных стенок.

Заметим, что исследования структуры вихреподобных асимметричных стенок в магнитно-одноосных пленках с плоскостной анизотропией проведены лишь при некоторых конкретных фиксированных значениях толщин и магнитных параметров пленок. Исключением является работа [9], где имеются данные об энергии асимметричных блоховских стенок в зависимости от намагниченности насыщения пленки. Однако и они получены лишь для одной конкретной толщины пленки.

Конечно, вряд ли можно ожидать появления в магнитно-одноосных пленках таких же особенностей структуры стенок, что и для магнитно-многоосных пленок. Однако соответствующие исследования безусловно необходимы, чтобы окончательно понять, являются ли асимметричные вихревые структуры универсальными или они су-

ществуют лишь в некоторой области изменения толщин и магнитных параметров пленок.

В настоящей работе приведены результаты исследования структуры и энергии двух типов асимметричных вихревых стенок — неелевской и блоховской — в широком интервале изменения намагниченности насыщения, обменного параметра и константы анизотропии. Нам также впервые удалось на основе прямых численных расчетов в рамках двумерного распределения намагниченности исследовать структуру указанных стенок в пленках очень больших толщин — вплоть до микрона. Следует заметить, что это потребовало использования расчетных сеток с очень большим числом ячеек.

2. Постановка задачи

Пусть имеется магнитоодноосная пленка толщиной b с плоскостью поверхности, параллельной плоскости xz , и с осью легкого намагничивания (ОЛН), ориентированной вдоль оси z , лежащей в плоскости пленки. Пусть магнитное состояние пленки соответствует двум доменам с намагниченностями насыщения $\pm M_s$, ориентированными вдоль $+z$ ($-z$) при $x > +a/2$ ($x < -a/2$). Предполагаем, что доменная стенка (ДС) сосредоточена в области V прямоугольного сечения D в плоскости xy и размером a вдоль x . Пусть в D намагниченность $\mathbf{M} = \mathbf{M}(x, y)$, что соответствует двумерной модели распределения \mathbf{M} .

В рамках двумерной модели равновесные конфигурации ДС и соответствующие им минимальные энергии γ_D могут быть найдены путем численной минимизации функционала

$$\gamma_D = \frac{1}{b} \iint_D \left\{ \frac{A}{M_s^2} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{K}{M_s^2} (\mathbf{M}\mathbf{c})^2 - \frac{1}{2} \mathbf{M}\mathbf{H}^{(m)} \right\} dx dy, \quad (1)$$

отнесенного к единице поверхности стенки (поверхности yz).

В (1) первое, второе и третье слагаемые в фигурных скобках представляют плотности обменной, магнитно-анизотропной и диполь-дипольной (в континуальном приближении) энергий соответственно; A — обменный параметр; \mathbf{c} — единичный вектор вдоль ОЛН; $\mathbf{H}^{(m)}$ — магнитостатическое поле, определяемое из уравнений магнитостатики с обычными граничными условиями.

Для решения задачи используется постоянство модуля намагниченности ($M^2 = \text{const}$) и следующие условия на границах расчетной области:

$$\left[\mathbf{M}, \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x} \right] \Big|_{y=\pm b/2} = 0, \quad (2)$$

$$M_z \Big|_{x=\pm a/2} = \pm M_s, \quad M_x \Big|_{x=\pm a/2} = M_y \Big|_{x=\pm a/2} = 0. \quad (3)$$

Для численной минимизации γ_D расчетная область D разбивается прямоугольной сеткой на малые ячейки. При этом V разбивается на вытянутые вдоль оси z параллелепипеды, боковые стенки которых параллельны координатным плоскостям xz и yz . Предполагается, что ячейки имеют макроскопические, но настолько малые размеры, что во всех точках каждого из параллелепипедов направление $\mathbf{u} = (\mathbf{M}/M_s)$ можно считать постоянным. Вдоль z $\mathbf{u} = \text{const}$ (двумерность модели). Ориентация \mathbf{M} в D меняется при переходе от ячейки к ячейке. Подробности можно найти в [1,10–12].

Использовались сетки с разным числом ячеек и разным отношением a/b . Максимальное число ячеек было 240×60 . Отношение a/b менялось в пределах $1 \leq a/b \leq 6$. В качестве базовых использовались параметры: $A = 10^{-6}$ erg/cm, $K = 10^{-3}$ erg/cm³, $M_s = 800$ G, характерные для пермаллоевых пленок. Критерий окончания счета выбирался согласно [13].

3. Результаты и их обсуждение

Численные исследования структуры и энергии асимметричных доменных стенок в пленках с плоскостной анизотропией показали, что в широкой области изменения толщины пленки b , намагниченности насыщения, обменного поля и поля анизотропии существуют именно асимметричные вихреподобные стенки. В качестве примера на рис. 1 приведено два хорошо известных типа таких стенок: асимметричные блоховские (a) и асимметричные неелевские (b). Эти данные получены нами прямыми численными методами для пленок большой толщины $b = 500$ nm при точном учете всех взаимодействий, существенно влияющих на распределение намагниченности. Здесь центральная штриховая линия представляет линию, на которой происходит изменение знака z -компоненты намагниченности. Именно из-за ее асимметрии по отношению к плоскости yz стенка и называется асимметричной. Две другие линии уровня $M_z = \text{const}$ проведены так, что при каждом x величина M_z/M_s меняется примерно на 75%. Представленные на рис. 1 данные соответствуют базовым значениям параметров пленок. Аналогичные структуры стенок получены и для пленок также с базовыми значениями параметров и с $b \in (40–1000)$ nm. С увеличением толщины пленок структура стенок в общем остается схожей с представленной на рис. 1. Происходят лишь увеличение изгиба центральной линии в стенке блоховского типа и вытягивание этой линии в стенке неелевского типа. Заметим, что, согласно [1], с увеличением b должна иметься тенденция, связанная с выпрямлением центральной части стенки и трансформацией ее в классическую блоховскую стенку. Однако вплоть до пленок толщиной 1000 nm такой тенденции нами не обнаружено. Таким образом, если она возможна при данных значениях параметров вещества, то лишь в пленках еще большей толщины.

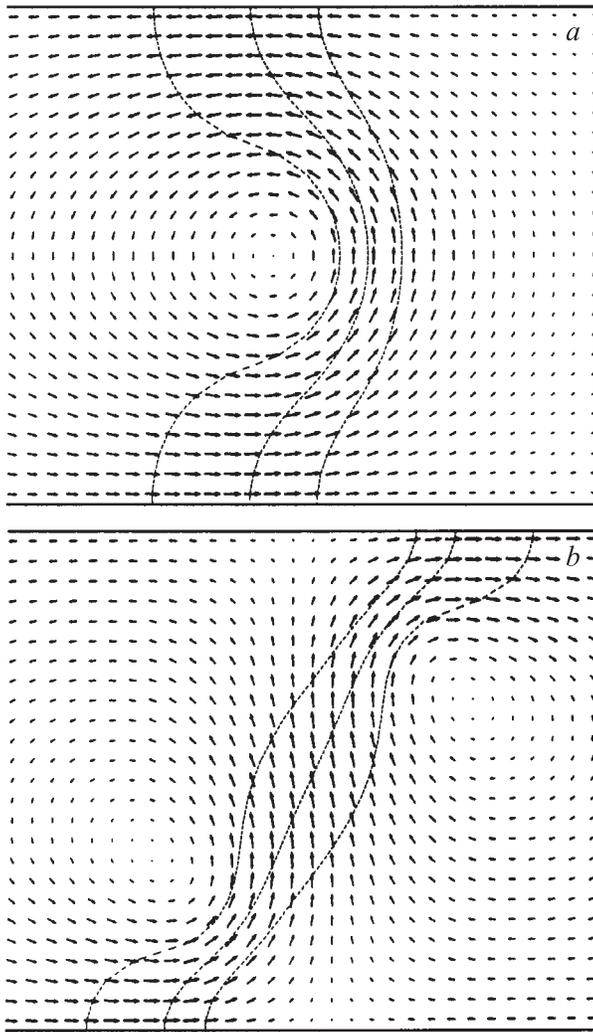


Рис. 1. Примеры структур асимметричных блоховской (а) и неелевской (b) стенок в магнитно-одноосных пленках с плоскостной анизотропией. Параметры пленок базовые, $b = 500$ nm. Расчет произведен на сетке с числом ячеек 150×50 . Для удобства восприятия в иллюстрируемых вариантах число ячеек уменьшено.

С целью установления стабильных и метастабильных состояний мы исследовали зависимость энергии асимметричных доменных стенок от толщины пленок при различных значениях магнитных параметров пленок. В качестве примера на рис. 2 такие зависимости приведены для базовых значений магнитных параметров. Наши данные показывают, что в отличие от магнитно-многоосных пленок, как и следовало ожидать, во всей области $b \in (40-1000)$ nm асимметричные блоховские стенки являются стабильными, а асимметричные неелевские – метастабильными. Энергия тех и других падает с увеличением толщины пленок. Однако в более толстых пленках процесс ее падения замедляется. Это указывает, в частности, на то, что относительный вклад магнито-статических взаимодействий уменьшается.

На рис. 3 представлены рассчитанные зависимости энергии стенок от намагниченности насыщения (кривые с точками) и для сравнения данные, приведенные в работе [9] (сплошные кривые без точек). При этом кривая 1 соответствует численным экспериментам [9], а 2 и 3 — данным, полученным на основе одномерных моделей распределения намагниченности при $b = 100$ nm. Во-первых, видно, что наши данные для двумерной модели распределения намагниченности хорошо согласуются с данными [9] при $b = 100$ nm.

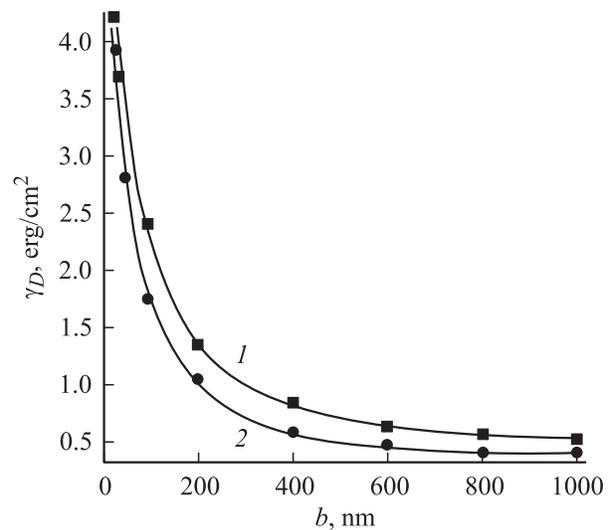


Рис. 2. Энергии (рассчитаны на единицу поверхности стенки) асимметричных блоховской (2) и неелевской (1) стенок в зависимости от толщины пленок с базовыми параметрами. Точки — численный эксперимент. Кривые, проходящие через точки, приведены для удобства восприятия.

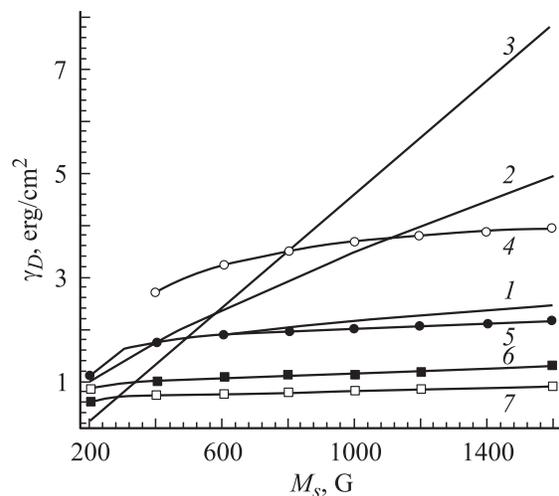


Рис. 3. Примеры зависимостей плотностей энергии асимметричных блоховских стенок от намагниченности насыщения для разных толщин пленок: 50 (4), 100 (5), 200 (6) и 300 nm (7). Кривые 1–3 взяты из [9] для сравнения. При этом: 1 — двумерная модель [9], 2 — одномерная блоховская стенка, 3 — одномерная неелевская стенка.

Во-вторых, видно также, что одномерные модели дают сильно завышенные значения энергии стенок начиная с некоторых значений намагниченности насыщения. Эти значения определяются точками пересечения прямой 3 с остальными кривыми (исключая 2). Важно отметить, что при уменьшении M_s более выгодными становятся одномерные неелевские, а не блоховские стенки. Как показывают численные исследования, этот же вывод относится и к более толстым пленкам толщиной до 1000 nm. Большая выгодность одномерных неелевских стенок связана с тем, что их обменная энергия оказывается меньше энергии вихреподобных стенок. Что же касается магнитостатической энергии, то в пленках с малыми значениями M_s она оказывается слишком малой для того, чтобы могла возникнуть необходимость образования сильно выраженной вихревой структуры стенки. При увеличении толщины пленки вихревые структуры стенок локализируются в больших областях пространства, и, следовательно, неоднородная часть обменного взаимодействия (именно она играет важную роль при образовании доменных стенок) становится меньше. При увеличении толщины пленки это и приводит к эффекту уменьшения значений M_s , при переходе через которые более выгодными становятся неелевские стенки.

Заметим, что, хотя блоховские стенки остаются асимметричными для магнитно-упорядоченных веществ с широким диапазоном намагниченности насыщения в пленках с малыми значениями намагниченности насыщения, эта асимметрия становится очень малой и структура стенок мало отличается от одномерных блоховских стенок. Однако это обстоятельство не имеет особого значения, поскольку, как указано выше, в этой области энергетически выгодными оказываются лишь стенки Нееля.

Аналогичные расчеты впервые были проведены нами и для асимметричных неелевских стенок. Соответствующие

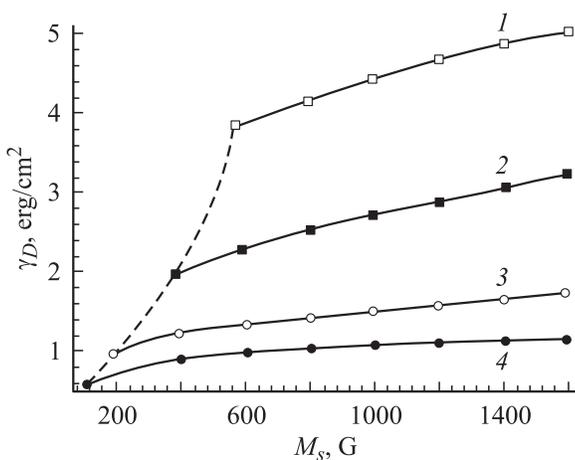


Рис. 4. Примеры зависимостей плотностей энергии асимметричных неелевских стенок от намагниченности насыщения для разных толщин пленок: 50 (1), 100 (2), 200 (3) и 300 nm (4). Левее штриховой линии асимметричная доменная стенка становится неустойчивой.

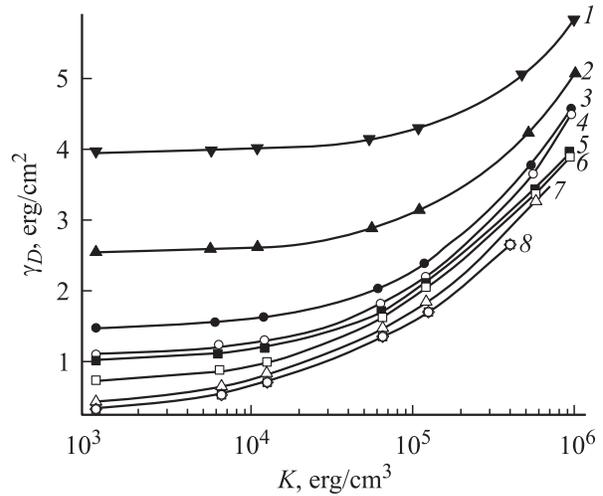


Рис. 5. Зависимость плотности энергии асимметричных блоховских (светлые значки) и неелевских (темные значки) доменных стенок от константы анизотропии для пленок разных толщин: 50 (1), 100 (2), 200 (3,4), 300 (5,6), 600 (7) и 1000 (8) nm.

щие результаты представлены для некоторых значений толщин пленок на рис. 4. Левые концы этих кривых (через них проходит штриховая линия) соответствуют точкам, в которых асимметричные неелевские стенки оказываются неустойчивыми и перестраиваются в одномерные неелевские. Аналогичные результаты имеют место и для более толстых пленок вплоть до 1000 nm. При этом, как и в случае асимметричных блоховских стенок, при уменьшении толщины пленки происходит смещение точек перестройки стенок в область малых намагниченностей насыщения. Физические причины такой перестройки и смещений аналогичны описанному выше для асимметричных блоховских стенок. Таким образом, видно, что асимметричные неелевские стенки существуют в широкой области изменения толщин пленок и намагниченностей насыщения. Правда, в отличие от магнитно-многоосных пленок они всегда остаются метастабильными.

На рис. 5 представлена зависимость энергии асимметричных стенок от константы анизотропии в широком диапазоне ее изменения, что может соответствовать пленкам различных материалов с плоскостной анизотропией.

Исследования показывают, что с увеличением константы анизотропии во всех случаях энергия стенок растет, что согласуется с предсказаниями одномерных моделей. Хотя во всех рассмотренных случаях асимметричные стенки существуют, по мере увеличения K структура вихревых стенок искажается: вихри вытягиваются вдоль нормали к поверхности пленки и становятся все менее выраженными. При этом центральная часть стенок все больше уплотняется и становится близкой по форме к одномерным блоховским стенкам. Это относится как к асимметричным неелевским, так

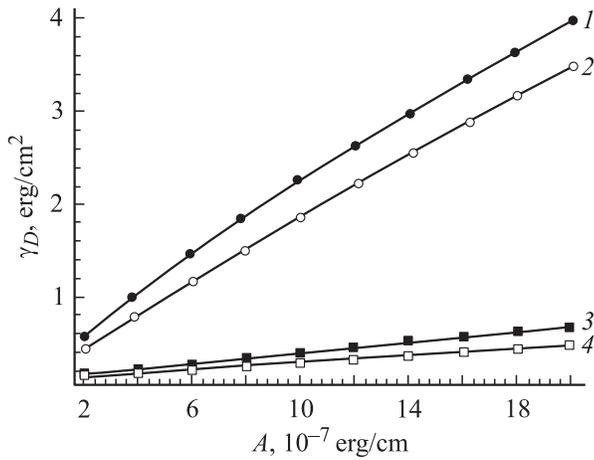


Рис. 6. Зависимость плотности энергии асимметричных блоховских (светлые значки) и неелевских (темные значки) стенок от обменного параметра для разных b : 50 (1, 2) и 500 (3, 4) nm.

и к асимметричным блоховским стенкам. При этом неелевские и блоховские стенки начинают лишь слабо отличаться как друг от друга, так и от одномерных блоховских стенок. Их энергии сближаются, как это видно из рис. 5 на примерах пленок толщиной 200 и 300 nm. В пленках малых толщин — 50, 100 nm — это происходит при K , примерно равных 10^6 erg/cm³. С увеличением толщин пленок соответствующая величина K уменьшается. Именно в соответствии с этим данные рис. 5 для пленок 600 и 1000 nm приведены для более узкого интервала K . Поскольку сближение энергий асимметричных стенок происходит очень плавно, приведенные конечные (правые) точки графиков нельзя рассматривать как некие критические точки.

На рис. 6 представлена зависимость энергии асимметричных доменных стенок от обменного параметра A для пленок двух разных толщин. Здесь вновь, как и в рамках одномерных моделей доменных стенок, энергии растут с ростом A . Однако характер этого роста отличается от корневого, характерного для одномерных моделей, что связано с большей ролью неоднородного обменного взаимодействия при образовании вихревых структур.

Одновременно с энергиями мы во всех случаях определяли распределение намагниченности в доменных стенках. Было установлено, что для широкого интервала изменения обменного параметра, охватывающего практически все известные на настоящий момент пленки с плоскостной анизотропией, существуют именно асимметричные вихреподобные стенки. Причем качественно их структура с изменением A не меняется.

Из рис. 6 видно, что существенное изменение толщины базовой пленки (в 10 раз) не приводит ни к каким дополнительным особенностям. Последнее связано с отмеченным выше сохранением вихревого характера доменных стенок при значительном изменении толщины пленки (от 50 до 1000 nm).

4. Выводы

Таким образом, на основе численного анализа и в рамках двухмерной модели распределения намагниченности при точном учете всех основных взаимодействий в магнитно-одноосных пленках с плоскостной анизотропией исследованы асимметричные вихреподобные стеночные структуры в широкой области изменения толщин пленок и их магнитных параметров.

Установлено, что в магнитных пленках с малым фактором качества $Q \ll 1$ асимметричные вихреподобные стеночные структуры блоховского и неелевского типа существуют в достаточно толстых пленках толщиной вплоть до 10^3 nm и в широкой области изменения магнитных параметров, т. е. являются универсальными.

Показано, что в отличие от магнитно-трехосных пленок в магнитно-одноосных пленках с плоскостной анизотропией асимметричные неелевские стенки во всей исследованной области толщин и магнитных параметров пленок всегда являются метастабильными.

При увеличении константы анизотропии структура асимметричных доменных стенок постепенно искажается. При этом отличия структур асимметричных блоховских и неелевских стенок и их энергий друг от друга и от структуры и энергии одномерных блоховских стенок становятся очень малыми. Так, в пермалловых пленках с $K \approx 10^6$ erg/cm³, $A = 2 \cdot 10^{-6}$ erg/cm, $M_s = 800$ G структура стенки становится близкой к структуре одномерной блоховской стенки, несмотря на то что в этом случае фактор качества Q все еще меньше 1 ($Q \approx 0.25$).

Список литературы

- [1] A.E. La Bonte. J. Appl. Phys. **40**, 6, 2450 (1969).
- [2] A. Hubert. Phys. Stat. Sol. (a) **32**, 2, 519 (1969).
- [3] J.N. Chapman, G.R. Morrison, J.P. Jacobovics, R.A. Taylor. J. Magn. Magn. Mater. **49**, 277 (1985).
- [4] M.R. Sheinfein, J. Unguris, R.J. Celotta, D.T. Prieence. Phys. Rev. Lett. **63**, 6, 668 (1989).
- [5] M.R. Sheinfein, J. Unguris, J.L. Blue, K.J. Coakley, D.T. Pierce, R.J. Celotta, P.J. Ryan. Phys. Rev. B **43**, 4, 3395 (1991).
- [6] T. Suzuki, K. Suzuki, Y. Igarashi. Jap. J. Appl. Phys. **15**, 4, 707 (1976).
- [7] S. Tsukahara, H.J. Kavakatsu. Phys. Soc. Jap. **32**, 6, 1493 (1972).
- [8] L.G. Korzunin, B.N. Filippov, F.A. Kassin-Ogly, I.A. Chaikovskiy. J. Magn. Magn. Mater. **298**, 1 (2006).
- [9] S.W. Yuan, H.N. Bertram. Phys. Rev. **44**, 22, 12395 (1991).
- [10] B.N. Filippov, L.G. Korzunin. IEEE Trans. Magn. **29**, 6, 2563 (1993).
- [11] Б.Н. Филиппов, Л.Г. Корзунин. ФММ **75**, 4, 49 (1993).
- [12] B.N. Filippov, L.G. Korzunin, F.A. Kassin-Ogly. Phys. Rev. B **64**, 10, 104412 (2001).
- [13] A. Aharoni. J. Appl. Phys. **39**, 2, 861 (1968).