Письма в ЖТФ, том 20, вып. 11 12 июня 1994 г.

05.2
©1994

ВИХРЕВЫЕ ДОМЕННЫЕ ГРАНИЦЫ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ С ПЛОСКОСТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Б.Н.Филиппов, Л.Г.Корзунин

Известно [1,2], что в магнитно-одноосных ферромагнитных пленках с осью легкого намагничивания (ОЛН) параллельной поверхности в области некоторых толщин (~ ~ 0.1 мкм в пермаллоевых пленках) доменные границы (ДГ) с наименьшей энергией (стабильные ДГ) имеют одновихревую асимметричную структуру (асимметричные блоховские границы — АБГ). Кроме этих ДГ, могут существовать также асимметричные двухвихревые неелевские (АДН) и симметричные двухвихревые блоховские (СДБ) доменные границы. В [3] было показано, что на стабильные свойства упомянутых выше ДГ существенное влияние оказывает поверхностная магнитная анизотропия. Следует ожидать, что наличие внутренних границ раздела магнитных сред (многослойные пленки) или неоднородных вдоль нормали к поверхности магнитных параметров (ионно-имплантированные пленки) также может сказаться на равновесных свойствах доменных границ. В предлагаемом сообщении приведены результаты численного расчета двухмерной структуры доменных стенок в многослойных пленках, отдельные слои которых имеют различные магнитные характеристики: обменные константы A, константы анизотропии K_v и намагниченности насыщения M_s. Мы нашли, что в таких пленках могут существовать стабильные доменные границы совершенно нового типа: симметричные двухвихревые ДГ с вертикально расположенными вихрями. Нами установлены также и другие интересные закономерности в тонкой структуре распределения намагниченности в доменных границах, которые будут описаны ниже.

Рассмотрим магнитно-одноосные ферромагнитные пленки с ОЛН, расположенной вдоль оси z координатной системы xyz с плоскостью xz, параллельной поверхности пленки.

Для исследования структуры доменной границы в рамках двухмерной модели распределения намагниченности ис-

пользован следующий функционал плотности энергии [3]:

$$\gamma_D = \iint\limits_D \left\{ A(y) \left[\left(\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial y} \right)^2 \right] + K_v(y) \left(m_x^2 + m_y^2 \right) - \right.$$

$$\left. -\frac{1}{2} \mathbf{m} \mathbf{H}^{(m)} M_s(y) \right\} + K_s \int\limits_{-a}^{a} m_y^2 dx. \qquad (1)$$

Здесь слагаемые,стоящие в фигурной скобке, представляют собой плотности обменной, магнитно-анизотропной и магнитостатической энергии. Последнее слагаемое учитывает энергию поверхностной магнитной анизотропии с константой K_s. Предполагается, что намагниченности соседних доменов ориентированы вдоль z и $-z$. При переходе от домена к домену $\mathbf{M}$ изменяется только в плоскости xy (двухмерные ДГ) в пределах некоторой области D (расчетная область). Величина $2a$ представляет собой размер D вдоль x, а $\mathbf{m} \equiv \mathbf{m}(\mathbf{r}) = \mathbf{M} \cdot M_s^{-1}(y)$, где $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{r})$ — намагниченность в точке $\mathbf{r}$, $\mathbf{H}^{(m)}$ — магнитостатическое поле, определяемое согласно формуле

$$\mathbf{H}^{(m)} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \int\limits_V d\mathbf{r}' M_i(\mathbf{r}') \frac{\partial}{\partial x'} \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \qquad (2)$$

где V — объем пленки.

Минимизация (1) осуществлялась при условии, что $\mathbf{M}^2 = M_s^2$ и что на поверхностях пленки ($y = \pm\frac{b}{2}$, b — толщина пленки) выполняются условия

$$\left[\mathbf{m}, A \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial n} + K_s (\mathbf{m}\mathbf{n}) \mathbf{n} \right] = 0, \qquad (3)$$

где $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к поверхности пленки.

На границах $x = \pm a$ мы использовали условия $M_z = \pm M_s$ и $M_{xy} = 0$. Ясно, что предположение о конечности D должно приводить к погрешности при вычислении γ_D. Однако, подбирая a надлежащим образом, можно сделать эту погрешность достаточно малой. Минимизация (1) может быть осуществлена только численными методами. Нами использован сеточный метод с соответствующей дискретизацией слагаемых (1). В качестве базовых выбраны параметры, характерные для пермаллоевых пленок: $A = 2 \cdot 10^{-6}$ эрг·см$^{-1}$, $M_s = 800$ Гс, $K_v = 10^3$ эрг·см$^{-3}$, $K_s = 0$.

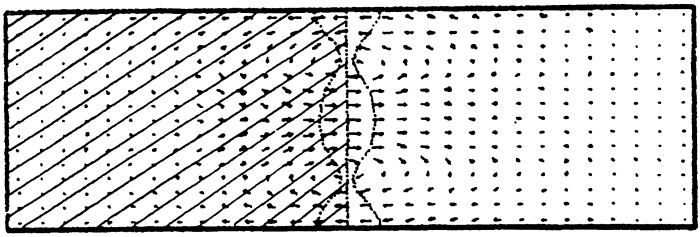

Рис. 1. Тонкая структура стабильной (соответствующей наименьшей энергии) доменной границы в трехслойной магнитной пленке с пониженной обменной энергией в приповерхностных слоях.

Расчеты показывают, что в многослойных пленках, слои которых отличаются величинами A, равновесная структура ДГ может сильно отличаться от соответствующей структуры ДГ однослойных пленок. Типичный результат расчета показан на рис. 1, где изображена структура стабильной ДГ нового типа. Показано сечение ДГ плоскостью, перпендикулярной ОЛН. Результаты получены для трехслойной пленки толщиной 0.1 мкм, причем в приповерхностных слоях толщиной 0.035 мкм $A = 2 \cdot 10^{-7}$ эрг·см$^{-1}$. Величина A среднего слоя, а также K_v, K_s и M_s соответствовали базовым значениям. Стрелки изображают локальные проекции $\mathbf{M}$ на плоскость xy. Длина стрелок дает величину $|\mathbf{M}|$. На светлой и заштрихованных частях рисунка z — компонента $\mathbf{M}$ положительна и отрицательна соответственно. Таким образом, вместо равновесной одновихревой ДГ в данном случае имеется симметричная двухвихревая ДГ с вертикально расположенными вихрями. На участке пленки с меньшими значениями A при переходе от домена с $\mathbf{M} \parallel \mathbf{k}$ ($\mathbf{k}$ — единичный вектор вдоль оси z) к домену с $M \parallel (-\mathbf{k})$ намагниченность разворачивается так, что отличны от нуля не только компоненты M_x и M_y, но и компонента M_z, которая проходит через нуль на вертикальной пунктирной линии (центр стенки). В средней части пленки, где A больше, структура ДГ близка к неелевской, т.е. разворот $\mathbf{M}$ происходит в основном в плоскости xy. Расстояние между правой и левой пунктирными линиями дает толщину ДГ при каждом значении y. Толщина ДГ определяется аналогично [3].

Появление описанной границы связано с тем, что вихри ДГ стремятся локализоваться в области с меньшими значениями A, что снижает величину обменной энергии пленки. Обычно вклад обменной энергии в γ_D является наибольшим (см. [1,3]). В силу сказанного, если центральная часть пленки будет иметь A меньше A приповерхностных слоев, то следует ожидать появления стабильной одновихревой асимме-

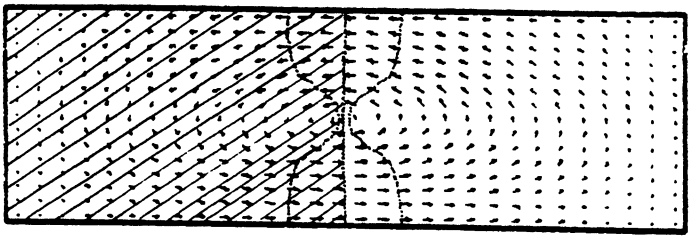

Рис. 2. Тонкая структура стабильной (соответствующей наименьшей энергии) доменной границы в трехслойной пленке с пониженной обменной энергией в центральной части.

тричной ДГ с вихрем, локализованным в центральной части пленки. Именно такая ДГ приведена на рис. 2. Эта структура получена для трехслойной пленки с теми же размерами, что и выше. Однако в данном случае $A = 2 \cdot 10^{-7}$ эрг·см$^{-1}$ для центральной части. При выбранном отличии центральной и приповерхностных частей, размеры вихря малы и его асимметрия слабо выражена. Заметим, что вихрь существует, даже если в центральной части $A \to 0$, что согласуется с [4]. Таким образом, большие перепады A служат некими барьерами, локализующими вихри ДГ на участках с пониженными A. При уменьшении перепада A вихрь постепенно распространяется на всю толщу пленки и асимметрия его увеличивается.

Возвращаясь к рис. 1, заметим, что помимо изображенной здесь ДГ, могут иметь место также СДБ доменные границы ($\varepsilon = \frac{\gamma_D}{2A} = 4.219$) и асимметричные одновихревые ДГ ($\varepsilon = 4.387$). Однако они являются метастабильными. Изменения M_s в пределах до двух раз, K_v на порядок и K_s от нуля до 2 эрг·см$^{-2}$ качественно не меняют результаты. В пленках, отдельные слои которых отличаются только величинами M_s, вихри локализуются в областях с повышенными M_s.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

[1] *La Bonte A.E.*// J. Appl. Phys. 1969. V. 40. N 6. P. 2450–2458.
[2] *Hubert A.*// Phys. Stat. Sol. (a). 1969. V. 32. N 2. P. 519–534.
[3] *Филиппов Б.Н., Корзунин Л.Г.* // ФММ. 1993. Т. 75. В. 4. С. 49–62.
[4] *Labrune M., Miltat J.*// Digests of Intern. Magn. Conf. / Ed. by the Dept of Cond. Matter Physics. Stockholm, 1993. P. ES–10.

Институт физики металлов
Екатеринбург

Поступило в редакцию
3 января 1994 г.