

05.2:11;12

## ПОДВИЖНОСТЬ ОДНОВИХРЕВЫХ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ

© В.И.Береснев, Л.Г.Корзунин, Б.Н.Филиппов

Хорошо известно, что структура доменных границ (ДГ) в тонких магнитных пленках (ТМП) не является одномерной. В частности, в [1-3] показано, что в ТМП с осью легкого намагничивания (ОЛН), лежащей в плоскости пленки, могут существовать двумерные асимметричные блоховские доменные границы. Однако до сих пор как статические, так и динамические модели, учитывающие двух- и даже трехмерный характер распределения вектора намагниченности в ДГ, были использованы для изучения свойств однослойных магнитных пленок. В настоящее время ведутся обширные исследования физических свойств многослойных пленок в связи с различными возможностями их применения. Наличие нескольких взаимодействующих слоев с разными магнитными характеристиками может приводить к образованию вихревых доменных границ, качественно отличающихся от существующих в однослойных пленках (см., например, [4,5]). В данной работе рассмотрено стационарное движение одновихревых блоховских ДГ в трехслойной пленке и в пределе малых скоростей рассчитаны их подвижности в зависимости от соотношения констант неоднородного обменного взаимодействия слоев.

Рассмотрим ТМП толщиной  $h$  с ОЛН, параллельной поверхности пластины, совпадающей с координатной плоскостью  $xz$  системы координат  $xuz$ . Будем считать, что в пленке существует 180-градусная ДГ, разделяющая домены с намагниченностями, ориентированными вдоль  $\pm z$ . Предполагается, что намагниченность  $M$  является функцией  $xu$  и не зависит от  $z$  (двумерная модель ДГ). Рассмотрим пленку, неоднородную по толщине, т. е. параметры  $M$  (намагниченность насыщения),  $A$  (константа обменного взаимодействия),  $K$  (константа одноосной анизотропии) зависят от  $u$ . Рассмотрим стационарное движение ДГ вдоль оси  $x$  со скоростью  $\dot{V}$ . Тогда энергия, рассчитанная на единицу длины в единицу времени, передаваемая ДГ внешним полем  $H$ , направленным вдоль оси  $z$ , есть

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{h/2}^{h/2} dy \dot{M}_z H. \quad (1)$$

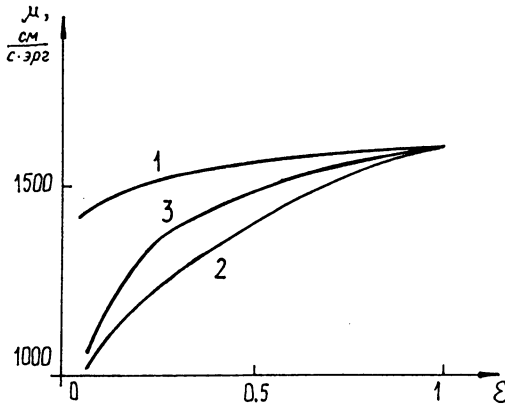


Рис. 1. Зависимость подвижности одновихревой блоховской доменной границы от отношения обменных параметров поверхностных слоев и центрального слоя:  $\epsilon = A_e/A_i$ ,  $A_i = 10^{-6}$  эрг/см, 1 —  $h_i = 0.08$  мкм, 2 —  $h_i = 0.05$  мкм, 3 —  $h_i = 0.02$  мкм,  $h = 0.1$  мкм.

Используя  $\dot{M}_z = -V \partial M_z / \partial x$  (стационарное движение), получаем

$$W = -2VhHM_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} dy M(y). \quad (3)$$

ДГ будет двигаться стационарно, если  $W$  полностью компенсирует диссипируемую за единицу времени энергию  $W_\tau$ , равную

$$W_\tau = -\frac{\tau}{\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-h/2}^{h/2} dy \frac{\dot{M}^2}{M}. \quad (4)$$

Вычисляя (4) и приравнявая  $W_\tau$  и  $W$ , получаем

$$V = \mu H, \quad (5)$$

где

$$\mu = \frac{\gamma}{\tau} \frac{2hM_{\text{ср}}}{\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{h/2}^{h/2} dy M(y) [\alpha_x^2 + \beta_x^2 + \gamma_x^2]}. \quad (6)$$

Здесь  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $\tau$  — параметр затухания Гильберта,  $(\alpha, \beta, \gamma)$  — направляющие косинусы вектора намагниченности,  $\alpha_x = \partial \alpha / \partial x$ ,  $\beta_x = \partial \beta / \partial x$ ,  $\gamma_x = \partial \gamma / \partial x$ .

Таким образом, для расчета подвижности ДГ необходимо знать ее структуру. При малых скоростях движения ДГ для расчета  $\mu$  можно использовать структуру статических стенок, которая находится в результате минимизации функционала плотности энергии ДГ [6]. Нами были проведены численные расчеты структуры ДГ при различных соотношениях толщин слоев в трехслойной пленке. В качестве базисных параметров приняты  $A = 10^{-6}$  эрг/см,  $K = 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>,  $m = 800$  Гс,  $\tau = 0.02$ ,  $h = 0.1$  мкм. Пусть пленка состоит из трех слоев с разными обменными параметрами, причем каждый из поверхностных слоев (верхний и нижний) имеют равную толщину и одинаковое значение  $A$ . Результаты минимизации функционала плотности энергии системы показывают, что в такой ТМП могут существовать стабильные одновихревые асимметричные ДГ. Используя результаты расчета структуры ДГ, согласно методу, описанному в [6], нами были рассчитаны подвижности таких ДГ в зависимости от отношения обменных параметров  $\varepsilon = A_e/A_i$  ( $A_i$  — обменный параметр внутреннего слоя,  $A_e$  — обменный параметр поверхностного слоя). На рис. 1 показана  $\mu(\varepsilon)$  для случая, когда  $A_e < A_i = 10^{-6}$  эрг/см при различных значениях толщины внутреннего слоя  $h_i$ . Как видно из рисунка, с увеличением  $\varepsilon$  величина  $\mu$  растет. При  $\varepsilon = 1$  обменные параметры всех трех слоев одинаковы и структура стенки совпадает со структурой однослойной пленки [1]. При уменьшении  $\varepsilon A_e$  становится меньше величины  $A_i$  среднего слоя. Как известно, для одновихревой ДГ ( $l^{-3}$ ) вихрь вектора намагниченности расположен в центральной части пленки и его энергия определяется главным образом обменной энергией. Как показывают расчеты структуры ДГ, при  $\varepsilon < 1$  вихрь начинает деформироваться в направлении к поверхностям пленки и сжимаясь вдоль оси  $x$ , что, в свою очередь, приводит к увеличению градиента вектора намагниченности в этом направлении. А  $\mu$  как раз обратно пропорциональна величинам  $\alpha_x$ ,  $\beta_x$ ,  $\gamma_x$  (формула (6)). Именно по этой причине подвижность одновихревой ДГ падает при уменьшении  $\varepsilon$ . Из рис. 1 также видно, что при  $h_i = 0.08$  мкм зависимость  $\mu(\varepsilon)$  слабая. Это и понятно, так как в этом случае толщина центрального слоя мало отличается от  $h$ . Наиболее сильное изменение  $\mu$  по сравнению с однослойной пленкой ( $\varepsilon = 1$ ) имеется для случая  $h_i = 0.05$  мкм (кривая 2). При  $h_i = 0.02$  мкм это изменение слабее, так как центральный слой много тоньше поверхностных. Из рисунка также видно, что при сильном отличии  $A_i$  и  $A_e$  (например, при  $A_e = 10^{-7}$ ) значение  $\mu$  для многослойной пленки может значительно отличаться от  $\mu$  в однослойной пленке (в 1.5 раза).

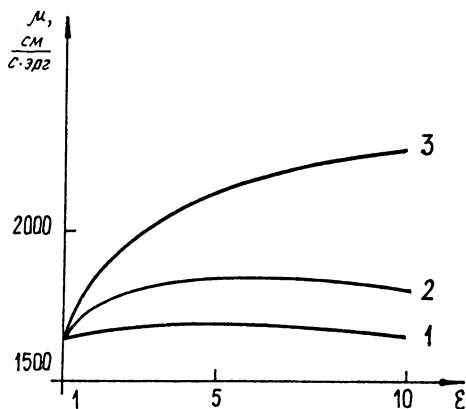


Рис. 2. Зависимость подвижности одновихревой блоховской доменной границы от отношения обменных параметров поверхностных слоев и центрального слоя:  $\epsilon = A_e/A_i$ ,  $A_e = 10^{-6}$  эрг/см, 1 —  $h_i = 0.08$  мкм, 2 —  $h_i = 0.05$  мкм, 3 —  $h_i = 0.02$  мкм,  $h = 0.1$  мкм.

На рис. 2 показана зависимость  $\mu(\epsilon)$  для случая  $\epsilon > 1$ , при этом  $A_e = 10^{-6}$  эрг/см<sup>3</sup>. Как видно из рисунка,  $\mu(\epsilon)$  для  $h_i$ , равного 0.08 и 0.05 мкм (кривые 1 и 2 соответственно), слабо меняется. Это связано с тем, что, как показывают расчеты структуры вихревой ДГ, распределение намагниченности в центральном слое, который занимает большую часть толщины всей пленки, практически не меняется. Для случая  $h_i = 0.02$  мкм толщины центрального слоя недостаточно для образования вихревой структуры, как это было бы для однослойной структуры, и поверхностные слои (в которых  $A$  больше) заставляют вихрь сплющиваться в направлении оси  $x$ , в результате чего градиент вектора намагниченности по оси  $x$  уменьшается с ростом  $\epsilon$ , а следовательно, растет  $\mu$ .

Итак, приведенные результаты показывают, что в многослойных пленках взаимодействие слоев с разными обменными параметрами может существенно влиять на динамические характеристики вихревых доменных структур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 93-02-16802).

#### Список литературы

- [1] La Bonte A.E. // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. N 6. P. 2450-2458.
- [2] Hubert A. // Phys. Stat. Solidi (a). 1969. V. 32. N 2. P. 519-534.
- [3] Aharoni A. // Phys. Stat. Solidi (a). 1973. V. 18. N 3. P. 661-667.

- [4] *Labrune M., Miltat J.* // IEEE Trans. Magn. 1993. V. 29. N 6. P. 2569–2571.
- [5] *Sanneck E., Ruhrig M., Hubert A.* // IEEE Trans. Magn. 1993. V. 29. N 6. P. 2500–2505.
- [6] *Филиппов Б.Н., Корзунин Л.Г.* // ЖТФ. Т. 66. № 2.

Институт физики  
металлов УрО РАН  
Екатеринбург

Поступило в Редакцию  
13 декабря 1995 г.

---