

05

©1993 г.

## КРИТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

*В.С.Герасимчук*

Проведен сравнительный анализ критических полей устойчивости цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) в двухслойных структурах, в качестве которых рассматриваются пленки с однородно намагниченным подслоем и ионно-имплантированные пленки ЦМД материалов. Определено превышение поля коллапса ЦМД в указанных структурах и проведен расчет эффекта самосмещения при "переключении покрывающего слоя".

### Введение

Достойное место в иерархии запоминающих устройств на магнитных носителях заняли ЦМД пленки, подвергнутые ионной имплантации (ИИ), и ЦМД пленки с однородно намагниченным подслоем (ОНП). Общим для этих типов пленок в соответствии с существующей терминологией [1] является наличие запоминающего слоя (собственно ЦМД носителя), намагниченность которого нормальна плоскости пленки, и управляющего слоя (слоя, подвергнутого имплантации, или подслоя) с намагниченностью, лежащей в плоскости пленки.

Понятно, что структурное подобие рассматриваемых материалов не обязательно влечет за собой подобие их технологических свойств или свойств ЦМД в них. Однако некоторые общие закономерности имеют место. Так, идентификация состояний доменных границ (ДГ) ЦМД в ИИ пленках и пленках с ОНП свидетельствует [2] об их существенном различии, несмотря на то, что число стабильных состояний, между которыми возможны переходы, одинаково. При прямом экспериментальном сравнении роли ИИ и ОНП наблюдались [3] как общие закономерности, так и различие динамических свойств ЦМД в запоминающем слое.

Имеется, однако, одна общая особенность, характерная для названных двухслойных структур. Это наличие на поверхности раздела между управляющим и запоминающим слоями вследствие обменного взаимодействия между ними, своеобразной торцевой ДГ (ТДГ), которая "закрывает" ЦМД на поверхности раздела, соединяясь с его боковыми ДГ. Задача распределения намагниченности в ТДГ ставилась неоднократно

и в различных вариантах [4-6]. С наличием ТДГ связан так называемый эффект авто- или самосмещения [5,7,8], более зримо проявляющийся в пленках с ОНП.

В настоящей работе исследование условий стабильности ЦМД проведено с учетом включения в полную энергию ЦМД вклада, обусловленного ТДГ. Определена плотность энергии 90° ТДГ при условии, что магнитные характеристики слоев различны и изменение намагниченности в ней происходит непрерывным образом. Установлены количественные значения превышения поля коллапса ЦМД за счет существования ТДГ в пленках с ИИ и ОНП. Проведено теоретическое обоснование эффекта самосмещения при "переключении покрывающего слоя", связанного [1] с наличием или отсутствием замыкающего домена в управляющем слое.

## 1. Расчет превышения поля коллапса ЦМД

Рассмотрим бесконечную плоскопараллельную двухслойную пленку одноосного материала с осью легкого намагничивания, перпендикулярной плоскости пленки. Пусть вдоль выделенной оси, совпадающей по направлению с осью  $Z$ , ориентировано внешнее магнитное поле напряженностью  $H$ . По направлению поля намагничен запоминающий слой пленки, в котором имеется центрально-симметричный ЦМД. Для определенности запоминающий слой будем называть слоем 1, а управляющий — слоем 2. Характер и направление намагниченности в нем конкретизировать пока не будем. В данном случае существенно то, что на границе раздела слоев благодаря обменному взаимодействию между ними возникает ТДГ, замыкающая основание ЦМД со стороны слоя 2,

$$E_w = \gamma S, \quad (1)$$

где  $\gamma = 4\pi M^2 l$  — плотность поверхностной энергии ТДГ;  $S$ ,  $l$ ,  $M$  — соответственно площадь основания ЦМД, характеристическая длина материала ТДГ и ее намагниченность.

Тогда выражение (1) можно записать в виде

$$(2\pi)^{-2} E_w = M^2 l \left( \frac{d}{2} \right)^2. \quad (2)$$

Учтем, что магнитостатика однородно намагниченного слоя не дает вклада в полную энергию двухслойной структуры [8]. Поэтому полная энергия рассматриваемой структуры будет включать полную энергию ЦМД в стандартной однослойной пленке [9] и соотношение (2)

$$(2\pi)^{-2} E = M_1^2 h_1^3 \left\{ \tilde{H} \frac{x^3}{2} + x \frac{l_1}{h_1} - I(x) + \left( \frac{x}{2} \right)^2 m^2 \frac{l}{h_1} \right\}. \quad (3)$$

Здесь введены безразмерные параметры  $d_i/h_1 = x_i$ ,  $M_i/M_1 = m_i$ ,  $H_i/4\pi M_1 = \tilde{H}$ ,  $i = 1, 2$ , где  $d$  — диаметр ЦМД,  $h_1$  — толщина слоя 1 (высота ЦМД),  $I(x)$  — силовая функция теории ЦМД [9].

Минимизируя выражение (3) по размеру ЦМД, найдем условие его равновесия

$$x \tilde{H} + \frac{l_1}{h_1} - F(x) + \frac{x}{2} m^2 \frac{l}{h_1} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $F(x) = dI(x)/dx$ . Из (4) следует возможность существования ЦМД в нулевом поле. Минимизируя выражение (3) дважды, определим критерий устойчивости ЦМД относительно коллапса

$$x_k \left[ \tilde{H}_k + \frac{m^2 l}{2 h_1} \right] = F(x_k) - \frac{l_1}{h_1}, \quad S_0(x_k) > \frac{l_1}{h_1}. \quad (5)$$

Здесь  $S_0(x) = F(x) - x dF(x)/dx$ . Соответствующий критерий однослойной пленки [9] в принятых здесь обозначениях равен

$$x_k \tilde{H}_k = F(x_k) - \frac{l_1}{h_1}, \quad S_0(x_k) > \frac{l_1}{h_1}. \quad (6)$$

Сравнивая критические поля для обоих типов пленок, находим, что поле коллапса ЦМД в двухслойной структуре выше соответствующего поля однослойной пленки на величину

$$\Delta \tilde{H}_k = \frac{m^2 l}{2 h_1}. \quad (7)$$

Чтобы охарактеризовать величину  $\Delta \tilde{H}_k$ , надо конкретизировать рассматриваемую модель. В случае легкоосной анизотропии в обоих слоях пленки ТДГ может проникать в тот или иной слой [7]. Если же один из них является одноосным, а другой легкоплоскостным, то ТДГ располагается в плоскости раздела слоев, проникая в каждый из них.

Пусть плоскость границы лежит в плоскости  $XOY$  прямоугольной системы координат, а направление вектора намагниченности  $M$  зависит только от переменной  $z$

$$M_z = M \cos \theta(z), \quad M_y = M \sin \theta(z), \quad M_x = 0. \quad (8)$$

При расчете распределения намагниченности в ТДГ учтем в плотности энергии магнетика плотность энергии обмена  $A_i$ , анизотропии  $K_i$  и магнитостатической энергии  $H_m^2/8\pi$  каждого слоя

$$W = \sum_{i=1}^2 \left\{ A_i [\theta'(z)]^2 - (K_i - 2\pi M_i^2) \cos^2 \theta(z) \right\}. \quad (9)$$

При этом, естественно,  $K > 0$  в слое с легкоосной анизотропией и  $K < 0$  в слое с анизотропией типа "легкая плоскость".

Выполняя известную вариацию плотности энергии и интегрируя, получим соотношение для угла  $\theta(z)$

$$\sum_{i=1}^2 \left\{ -A_i [\theta'(z)]^2 + (K_i - 2\pi M_i^2) \sin^2 \theta(z) \right\} = C_i, \quad (10)$$

которое должно удовлетворять граничным условиям выбранной модели

$$\theta(z = -\infty) = 0, \quad \theta(z = \infty) = \pi/2. \quad (11)$$

В результате имеем уравнения для равновесного распределения  $\theta(z)$

$$\begin{aligned}\Delta_1 \theta_1'(z) &= \sin \theta_1(z) \quad \text{при } z < 0, \\ \Delta_2 \theta_2'(z) &= \cos \theta_2(z) \quad \text{при } z > 0,\end{aligned}\quad (12)$$

где  $\Delta_1 = \Delta_{01} \sqrt{1 - Q_1^{-1}}$ ,  $\Delta_2 = \Delta_{02} \sqrt{Q_2^{-1} - 1}$  — параметры толщин ТДГ, определяющие степень ее проникновения в соответствующие слои;  $\Delta_{0i}^2 = A_i / K_i$ ;  $Q_i = K_i / 2\pi M_i^2$  — фактор качества материала слоя.

Предположим, что на границе раздела слоев ( $z = 0$ ) выполняется условие

$$A_1 \theta_1'(z) / z=0 = A_2 \theta_2'(z) / z=0, \quad \theta(z = 0) = \theta_0, \quad (13)$$

откуда следует, что положение вектора намагниченности в плоскости  $z = 0$  определяется параметрами обоих слоев

$$\theta_0 = \operatorname{arctg} \frac{\sigma_{02} \sqrt{Q_2^{-1} - 1}}{\sigma_{01} \sqrt{1 - Q_1^{-1}}}, \quad \sigma_{0i} = 4\sqrt{A_i K_i}. \quad (14)$$

Выражение (14) является условием “сшивки” решений уравнений (12), которые можно записать в виде

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2} &= \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2} \exp \frac{z}{\Delta_1} \quad \text{при } z < 0, \\ \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta_2}{2} \right) &= \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta_0}{2} \right) \exp \frac{z}{\Delta_2} \quad \text{при } z > 0.\end{aligned}\quad (15)$$

Интегрируя (9), с учетом (15) получим выражение для плотности энергии ТДГ

$$\gamma = \sigma_{01} \sqrt{1 - Q_1^{-1}} \sin^2 \frac{\theta_0}{2} + \sigma_{02} \sqrt{Q_2^{-1} - 1} \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta_0}{2} \right), \quad (16)$$

которое в частном случае  $A_1 = A_2$  и  $M_1 = M_2$  совпадает с [4].

Как и следовало ожидать, плотность поверхностной энергии ТДГ двухслойной структуры является функцией магнитных параметров обоих ее слоев.

Следовательно, превышение поля коллапса ПМД в двухслойной структуре рассматриваемого типа определяется выражением (7) с учетом (14) и (16).

Оценим величину возможного эффекта.

1) ПМД — пленка с ОНП. Возьмем типичные параметры ПМД слоя  $A_1 = 2.4 \cdot 10^{-7}$  эрг/см,  $K_1 = 2 \cdot 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>,  $4\pi M_1 = 330$  Гс,  $h_1 = 0.7$  мкм. Подслой железо-иттриевого граната имеет параметры  $A_2 = 3.7 \cdot 10^{-7}$  эрг/см,  $K_2 = 5 \cdot 10^2$  эрг/см<sup>3</sup>,  $4\pi M_2 = 1800$  Гс. Тогда плотность энергии  $\gamma = 0.107$  эрг/см<sup>2</sup> и  $\theta_0 = 75^\circ 35'$ . Превышение поля коллапса ПМД составляет примерно  $\Delta \tilde{H}_k = 30$  э.

2) ЦМД — пленка с ИИ слоем. Параметры ЦМД слоя те же, что и выше. Характеристики ИИ слоя примем равными  $A_2 = 0.8 \cdot 10^{-7}$  эрг/см,  $K_2 = 1 \cdot 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>,  $4\pi M_2 = 100$  Гс. В результате имеем  $\gamma = 0.019$  эрг/см<sup>2</sup>, угол  $\theta_0 = 9^\circ 80'$  и превышение поля коллапса около  $\Delta \tilde{H}_k = 6$  э.

Критическое поле в обоих случаях повысилось относительно поля коллапса ЦМД в однослойной пленке. Интересно сравнить значения угла  $\theta_0$ .

## 2. Расчет эффекта самосмещения при “переключении покрывающего слоя”

Рассмотрим еще один возможный механизм проявления эффекта самосмещения в двухслойных структурах. Известно [1], что в ИИ пленках имеет место так называемый процесс “переключения покрывающего слоя”, обладающий заметным гистерезисом и сильно влияющий на состояние ДГ ЦМД, существующих в запоминающем слое. У покрывающего слоя имеются два характерных состояния, одно из которых связано с наличием замыкающего домена в управляющем слое, а другое представляет собой полностью насыщенное состояние этого слоя. Размеры замыкающего домена зависят от величины поля в плоскости пленки. Показательно, что намагниченность этого домена может отклоняться от направления поля в плоскости.

Поставим задачу определения условий стабильности ЦМД в запоминающем слое от наличия или отсутствия домена в управляющем (покрывающем) слое. В общем виде подобная задача решена в [10]. Здесь мы рассмотрим ее приложение к интересующей нас двухслойной структуре.

В качестве модельной рассмотрим структуру, состоящую из двух доменовосодержащих слоев, каждый из которых, как и выше, будем характеризовать своим набором параметров. Однако теперь считаем, что намагниченности обоих слоев направлены вдоль легкой оси: вдоль выделенной оси ориентированы, следовательно, и домены, и внешнее поле подмагничивания. Отметим также, что в такой модели ТДГ является  $180^\circ$  и плотность ее поверхностной энергии равна  $\gamma_0 = \sigma_{0i} \sqrt{1 - Q_i^{-1}}$ . При ее расчете следует учитывать, в каком из слоев она находится. Вследствие отличия размеров доменов в слоях ТДГ имеет форму кольца площадью  $\pi/4 (d_1^2 - d_2^2)$ .

Пусть слой 2 имеет существенно меньшую толщину, нежели запоминающий слой. Полагая  $h_2 < h_1$  и считая, что  $d_1 - d_2 < d_1$ , можно получить разложение условий равновесия ЦМД в слое 1 по степеням указанных отношений до квадратичных членов [10]

$$x_1 \left[ \tilde{H} + \frac{l}{h_1} \frac{m^2}{2} \right] + \frac{l_1}{h_1} - F(x_1) - tm_2 Q(x_1) = 0, \quad (17)$$

где  $Q(x) = F(x) + S_0(x)$ ,  $t = h_2/h_1$ .

Решение уравнения (17) определяет равновесный размер ЦМД в запоминающем слое

$$x_1 = x_0 \left\{ 1 + tm_2 Q(x_0) \left[ S_0(x_0) - \frac{l_1}{h_1} \right]^{-1} \right\} \quad (18)$$

через  $x_0 = d_0/h_1$ , соответствующее равновесному размеру ЦМД в отсутствие домена в покрывающем слое.

Условие коллапса ЦМД в запоминающем слое в данном приближении преобразуется к виду [10]

$$S_0(x_{1k}) + tm_2 [2S_0(x_{1k}) - x_{1k}S'_c(x_{1k})] > \frac{l_1}{h_1}, \quad (19)$$

где  $S'(x) = dS(x)/dx$ .

Соответствующее ему поле зависит от диаметра коллапса ЦМД слоя 1 ( $d_{1k}^0$ ), вычисленного в предположении отсутствия домена в слое 2

$$x_{1k}^0 \left[ \tilde{H}_k + \frac{l}{h_1} \frac{m^2}{2} \right] = F(x_{1k}^0) - \frac{l_1}{h_1} + tm_2 Q(x_{1k}^0). \quad (20)$$

Отсюда легко установить различие критического поля для ЦМД в запоминающем слое, обусловленное наличием или отсутствием домена в покрывающем слое,

$$\Delta \tilde{H}_{1k} = \frac{tm_2}{x_{1k}^0} Q(x_{1k}^0). \quad (21)$$

Величина  $\Delta \tilde{H}_{1k} > 0$ , что свидетельствует о более высоком критическом поле ЦМД в том случае, если и в покрывающем слое имеется домен.

Появление домена в покрывающем слое приводит к изменению размера коллапса  $x_{1k} = d_{1k}/h_1$  по сравнению с ситуацией, когда его не было ( $x_{1k}^0 = d_{1k}^0/h_1$ ) на величину

$$\Delta x_{1k} = tm_2 \left\{ x_{1k}^0 - 2S_0(x_{1k}^0) [S'(x_{1k}^0)]^{-1} \right\}. \quad (22)$$

Предположим далее, что в рассматриваемой модели слои пленки имеют лишь различные толщины  $h_1$  и  $h_2$ , в то время как все остальные их параметры совершенно идентичны. Тогда ЦМД, существующий в запоминающем слое, "прорастает" через всю пленку. Это означает, что мы фактически имеем обычную ЦМД — пленку толщиной  $(h_1 + h_2)$ , описываемую теорией Тиля [9]. Поле коллапса ЦМД в такой пленке в нашем приближении есть

$$x_{1k}^0 \tilde{H}_{1k} = F(x_{1k}^0) - \left( 1 + \frac{1}{2} x_{1k}^0 \right) \frac{l_1}{h_1} + tQ(x_{1k}^0). \quad (23)$$

Из соотношений (20) и (23) следует, что критическое поле ЦМД в запоминающем слое при наличии замыкающего домена в покрывающем слое отличается от соответствующего поля для обычной ЦМД пленки такой же толщины на величину

$$\Delta \tilde{H}_k = \frac{t}{x_{1k}^0} (m_2 - 1) - \frac{1}{2h_1} (lm^2 - l_1), \quad (24)$$

знак которой зависит от отношения магнитных параметров слоев пленки. Определенным подбором этих параметров можно добиться как положительного, так и отрицательного эффекта, связанного с "переключением покрывающего слоя".

Действительно, полагая, что ТДГ реализуется в ЦМД слое, и принимая такие же параметры слоев, как и в разделе 1, определим  $\Delta \tilde{H}_k$ , если  $h_2 = 0.1$  мкм,  $x_{1k}^0 = 1$ . Из (24) получаем  $\Delta \tilde{H}_k = -30$  э.

Следовательно, процесс "переключения покрывающего слоя" в исследуемых двухслойных структурах приводит к заметным изменениям условий стабильности ЦМД в запоминающем слое таких пленок.

Автор выражает признательность Ю.И.Горобцу за интерес к работе и полезные обсуждения.

### Список литературы

- [1] *Малозёмов А., Слонзуски Дж.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982. 382 с.
- [2] *Magnin J.* // IEEE Trans. Magn. 1979. Vol. MAG-15. N 6. P. 1510-1512.
- [3] *Harvey W.A., Nelson G.L., Tolman C.H., Torok E.J.* // IEEE Trans. Magn. 1982. Vol. MAG-18. N 6. P. 1340-1342.
- [4] *Henry G.R.* // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 10. P. 5499-5501.
- [5] *Wang X.B., Chang H.* // IEEE Trans. Magn. 1981. Vol. MAG-17. N 6. P. 2778-2780.
- [6] *Wilson L.O., Nelson T.J.* // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. N 7. P. 4163-4167.
- [7] *Uchishiba H., Tominaga H., Namikata T.* // Fujitsu Sci. Techn. J. 1974. N 7. P. 165-188.
- [8] *Горобец Ю.И., Герасимчук В.С., Ильчишин О.В. и др.* // Деп. в ВИНТИ. № 2 (148). М., 1984.
- [9] *Thiele A.A.* // J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. N 3. P. 1139-1145.
- [10] *Герасимчук В.С.* // Микроэлектроника. 1988. Т. 17. Вып. 1. С. 33-42.

Макеевский инженерно-строительный институт

Поступило в Редакцию  
19 февраля 1992 г.  
В окончательной редакции  
3 марта 1993 г.