

## Влияние внешних напряжений сжатия на самоорганизованную доменную структуру в пленках толщиной квантовых ям, напыленных в вакууме

<sup>†</sup>Сагдаткиреева М.Б., Янтилин И.Ф., Хасанов Н.А.

Башкирский государственный университет, г. Уфа

<sup>†</sup>sagdatkireeva@mail.ru

## Effect of compressive external stresses on the self-organized domain structure in quantum well thickness films deposited in vacuum

<sup>†</sup>M.B. Sagdatkireeva, I.F. Yantilin, N.A. Hasanov

Bashkir State University, Ufa

Исследуется воздействие внешних напряжений сжатия на самоорганизованную доменную структуру в косо-напыленных в вакууме пленках.

**Ключевые слова:** доменная структура, магнитоупругая энергия, ферромагнитные плёнки

The effect of external compressive stresses on the self-organized domain structure in the obliquely vacuum deposited films is studied.

**Key words:** domain structure, magnetoelastic energy, ferromagnetic films

В последние десятилетия появилось большое число теоретических и экспериментальных работ по изучению доменной структуры (ДС) в связи с возможностью ее использования в высокочастотных и запоминающих устройствах, в микроэлектронике. Поиск путей создания нужного вида доменных конфигураций с заданной совокупностью статических и динамических свойств привел к более глубокому экспериментальному и теоретическому изучению доменной структуры в ферромагнитных пленках, в том числе в напыленных в вакууме пленках с наклонной анизотропией, имеющих толщину, близкую к толщине квантовых ям (КЯ) (примерно 5-200 нм) [5-6].

Экспериментальные исследования воздействия внешних напряжений сжатия на магнитную структуру показывают, что эти напряжения в ферромагнитных пленках обуславливают возникновение добавочной анизотропии ( $\lambda_s | \vec{\sigma} |$ ), которая, складываясь с анизотропией, ранее имевшийся в пленке, вызывают поворот векторов намагниченности в направлении новой оси эффективной анизотропии [1,2]. Здесь  $\lambda$ -константа магнитострикции,  $\vec{\sigma}$ -вектор внешних напряжений типа сжатия. Внешние напряжения вызывают перестройку доменной границы (ДГ), доменной структуры, изменение поля анизотропии, полярности ДГ, тонкой структуры (ТС) доменных границ, коэрцитивной силы и других магнитных характеристик [2-4]. В связи с этим, появля-

ется возможность при помощи давления создавать регулируемую по знаку и величине анизотропию, а также необходимую доменную структуру [7-8].

В данной работе впервые теоретически в рамках подхода, развиваемого в статьях [7-8], на основе результатов экспериментальных данных проанализировано влияние внешних напряжений сжатия, индуцирующих положительную анизотропию, на характер перестройки самоорганизованной ДС в пленках с наклонной анизотропией толщиной КЯ.

Результирующая эффективная константа анизотропии имеет следующий вид:

где

$$\Phi_{\text{PEZ}} = \Phi_1 + \frac{\Phi_2}{2} \left( 1 + \left( 1 + \frac{4\Phi_1'^2}{\Phi_2'^2} \right)^{1/2} \right) \quad (1),$$

$$\Phi_1 = - \left[ K_a - 8K_\psi + \frac{1}{2}(N_{\psi y} - N_{\psi x}) - \frac{1}{2}(N_{\psi z} - N_{\psi x}) \cos^2 \psi + \frac{2B_1^2}{c_{12} - c_{12}} + \frac{B_2^2}{c_{44}} \cos^2 \psi \right] M_s^2$$

$$\Phi_2 = \left[ K_a + 8K_\psi \tan^2 \psi - \cos 2\psi (N_{\psi z} - N_{\psi x}) - \frac{B_2^2 \cos 2\psi}{c_{44}} \left( \frac{1}{\cos^2 \psi} + 1 \right) \right] M_s^2,$$

$$\Phi_1' = \left( -4K_\psi \tan \psi - \frac{1}{2}(N_{\psi z} - N_{\psi x}) \sin 2\psi - \frac{B_2^2}{c_{44}} (\tan \psi (1 + \cos^2 \psi)) \right) M_s^2, \quad (2)$$

$$N_{\varphi x} = -\frac{4\lambda}{D} \frac{(\lambda/S)^2}{T^3(\lambda/S)} \left\{ 1 - \frac{\pi D}{\lambda} T(\lambda/S) - \exp\left(-\frac{\pi D}{\lambda} T(\lambda/S)\right) \right\}$$

$$T(\lambda/S) = [1 + (\lambda/S)^2]^{1/2}$$

$$R = \frac{\phi_2 \left( 1 + \frac{4\phi_1^2}{\phi_2^2} \right)^{1/2}}{\phi_1}, \quad (4)$$

$$N_{\varphi y} = -\frac{4\lambda}{D} \frac{1}{T^3(\lambda/S)} \left\{ 1 - \frac{\pi D}{\lambda} T(\lambda/S) - \exp\left(-\frac{\pi D}{\lambda} T(\lambda/S)\right) \right\},$$

$$N_{\varphi z} = \frac{4\lambda}{D} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\pi D}{\lambda}\right) \right\} \quad (3)$$

Здесь  $\psi$  - угол наклона оси лёгкого намагничивания (ОЛН) относительно нормали к плоскости пленки,  $K_a$  - константа наведенной анизотропии в плоскости пленки,  $\hat{E}_\psi$  - константа наклонной анизотропии,  $N_{\varphi x}$ ,  $N_{\varphi y}$ ,  $N_{\varphi z}$  - компоненты тензора размагничивающего фактора по трем соответствующим направлениям осей, зависящие от толщины пленки и типа реализуемых доменных структур,  $B_1, B_2$  - магнитоупругие константы,  $C_{11}, C_{12}, C_{44}$  - упругие константы,  $M_s$  - намагниченность насыщения.

Формулы (1), (2), (3) были получены авторами ранее путём минимизации суммы свободных энергий с учётом обменного взаимодействия, магнитной кристаллической анизотропии, магнитостатической, упругой и магнитоупругой энергий (см. работы [7], [8]).

Вид доменной структуры в этих плёнках зависит от параметра

названного авторами в предыдущих работах фактором качества плёнки толщиной КЯ.

Угол выхода вектора намагниченности из плоскости плёнки в домене равен  $\pi/2 - \psi - \frac{1}{2} \arctg(\phi_1/\phi_2)$ .

Анизотропия, индуцированная напряжениями сжатия, является основной причиной видоизменения самоорганизованных ДС. Динамика изменения самоорганизованных ПДС в косонапылённых плёнках толщиной КЯ в вакууме с наклонной анизотропией под действием внешних напряжений типа сжатия ( $|\sigma_1| < |\sigma_2| < |\sigma_3| < |\sigma_4|$ ) в приближении  $4\phi_1^2/\phi_2^2 < 1$ , представлена в таблице 1.

Примечание:  $\phi_1, \phi_2, \phi_1'$  - эффективные константы

анизотропии,  $1_{1ks} = [2E(k_s) - k_s^2 K(k_s)]/k_s^2 K(k_s)$ ,  $1_{2ks} = [K(k_s) - 2E(k_s)]/k_s^2 K(k_s)$ ,  $1_{1k_\lambda} = [2E(k_\lambda) - K(k_\lambda) k_\lambda'^2]/2k_\lambda$ ,  $k_\lambda'^2 = 1 - k_\lambda^2$

$k_\lambda^2; k_s'^2 = 1 - k_s^2; 1_{2k\lambda} = [K(k_\lambda) - 2E(k_\lambda)]/2k_\lambda$ , где  $k_s, k_\lambda$  - модули эллиптических интегралов I и II родов соответственно:  $K(k_s), K(k_\lambda), E(k_s), E(k_\lambda); \lambda$  - полупериод ДС,  $s$  - полупериод периодической тонкой структуры (ТС);  $\Delta$  - ширина периодической ДГ

Таблица 1.

Динамика изменения самоорганизованных ПДС за счет связанной магнитоупругой волны в косонапылённых пленках толщиной квантовых ям в вакууме с наклонной анизотропией под влиянием внешних напряжений сжатия [7 8]

№ фазы	Условия сущ-ния ДС	Энергия ДГ	Полярность		Вид доменной структуры (ДС)
			ДГ	ТС	
0	$\phi_1 < 0,$ $\phi_2 < 0,$ $ R  \leq 1$	$E_0 = 4\phi_1 \Delta l_{2k_\lambda} [1 + R \cdot 1_{1k_s}],$ $0.68 \leq k_s \leq 0.91$ Исходная ОПДС	-	-	$0.55 \leq k_\lambda \leq 0.91$ (отрицательная полосовая)
1	$\phi_1(\sigma_1) < 0,$ $\phi_2 + \lambda_s \sigma_1 < 0,$ $ R  \leq 1$	$E(\sigma_1) = 4\phi_1 \Delta l_{2k_\lambda} [1 + R \cdot 1_{2k_s}],$ $0.68 \leq k_s \leq 0.91$		-	$0.55 \leq k_\lambda \leq 0.91$ (отрицательная полосовая)
2	$\phi_1(\sigma_2) < 0,$ $\phi_2 + \lambda_s \sigma_2 = 0$	$E(\sigma_2) = 4\phi_1 \Delta l_{2k_\lambda}$	-		$0.55 \leq k_\lambda \leq 0.91$ (отрицательная полосовая)
3	$\phi_1(\sigma_3) > 0,$ $\phi_2 + \lambda_s \sigma_3 > 0$	Распад доменной структуры неограниченным расширением ДГ			-
4	$\phi_1(\sigma_4) > 0,$ $\left  \frac{\phi_2}{\phi_1} \right  < 1$	$E(\sigma_4) = 4\phi_1 \Delta l_{1k_\lambda}$	+		$k_\lambda \approx 1$ вида Широкова

$$\Delta(s) = \Delta_0 [1 - R_{1k_s}]^{-\frac{1}{2}}, \quad \text{где} \quad \Delta_0 = \left( \frac{AMs^2}{|\phi_1|} \right)^{\frac{1}{2}} -$$

ширина однородной ДГ, D – толщина пленки.

Как видно из таблицы, исходная доменная структура (в отсутствие сжатия) при условиях  $\phi_1 < 0$ ,  $\phi_2 < 0$ , является отрицательной полосовой, имеющей доменные границы (ДГ) с плотностью тонкой структуры (ТС), соответствующей  $k_\lambda$  в области значений  $0.68 \leq k_\lambda \leq 0.91$ . Период ДС соответствует  $k_\lambda$  в области значений  $0.55 \leq k_\lambda \leq 0.91$ . При этом полярности ДГ и ТС отрицательны (см. табл. 1 фаза 0 (верхняя строка)).

Положительная анизотропия, индуцированная внешними напряжениями сжатия, складываясь с эффективными анизотропиями  $\phi_1 < 0$ ,  $\phi_2 < 0$ , приводит к неустойчивому состоянию исходную отрицательную полосовую доменную структуру (ОПДС1) (табл. фаза 1). При этом сохраняется вид ОПДС1 и периодическая тонкая структура в ДГ, соответствующая  $0.55 \leq k_\lambda \leq 0.91$  (см. табл. 1 фаза 1, 2).

Как видно из таблицы, последовательное наращивание сжатия плёнки сопровождается изменением знаков эффективных констант  $\phi_2 + \lambda_s \sigma$  и  $\phi_1(\sigma)$ . Если в процессе сжатия выражение  $\phi_2 + \lambda_s \sigma$  становится равным 0, происходит переход существующей ОПДС в ОПДС с границами без тонкой структуры (табл. фаза 2).

А в случае, когда  $\phi_1(\sigma) \rightarrow 0$ ,  $\phi_2 + \lambda_s \sigma > 0$ , происходит распад доменной структуры на мелкие ДС с неограниченным расширением доменных границ (табл. фаза 3).

Если под воздействием сжатия величина  $\phi_1(\sigma)$  становится положительной, то при условии  $|\phi_2/\phi_1| < 1$  происходит возрождение доменной структуры типа Широбокова (табл.1 фаза 4).

Как видно из вышеприведенного анализа, влияние внешних напряжений типа сжатия на ДС пленок толщиной КЯ с наклонной анизотропией приводит к распаду существующей ДС и возрождению новой ДС. Данные

процессы можно описать как фазовые переходы второго и первого рода.

С помощью внешних напряжений типа сжатия в широких пределах можно изучать процессы перемангничивания, взаимосвязь между магнитными характеристиками, определять термодинамические, кинетические свойства и энергетический спектр ферромагнетика. Наличие давления может существенно изменить зависимость резонансной частоты от магнитного поля и др.

## Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Госиздат, 1959, 201 с.
2. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971, 1032 с.
3. Буравихин В.А., Круговер П.И. Влияние механических напряжений на магнитные свойства пленок. Сб.: Физика магнитных пленок. Иркутск, 1967, С. 145.
4. Буравихин В.А., Горохов Е.А., Кондратьев И.Н., Селин Г.Н. Влияние механических напряжений на магнитные свойства «закритических» пленок. Сб.: Физика магнитных пленок, Чита, 1972, С. 154.
5. Карабанова В.П. Структура доменных границ в ферромагнитных плёнках толщиной 100-1000 Å. Автореферат дисс. канд. физ.-матем. наук. М., 1971, 80 с.
6. Горохов Е.А., Карабанова В.П., Семин Г.Н. Полосовая доменная структура косоосаждённых плёнок никеля. Сб.: Материалы конференции по физике магнитных явлений. Чита, 1972, С. 102-107.
7. Сагдаткиреева М.Б., Румянцева В.В. Самоорганизация полосовой доменной структуры в косоапыленных квантовых ямах в вакууме. Изв. РАН. Сер. физ., 2009, Т.73, №8, С. 1214-1219.
8. Сагдаткиреева М.Б., Румянцева В.В. Характер наклонной анизотропии в апыленных в вакууме квантовых ямах. Изв. РАН. Сер. физ., 2010, Т.74, №8, С. 1143-1146.