

УДК 539.23 : 538.22

**ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ВНЕШНЕГО ПОЛЯ
НА КИНЕТИКУ ПЕРЕСТРОЙКИ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ
НАКЛОННО ОСАЖДЕННЫХ ПЛЕНОК***Л. С. Палатник, Л. И. Лукашенко, Л. З. Лубяный*

Исследована перестройка доменной структуры при перемагничивании наклонно осажденных пленок пермаллоя, обладающих перпендикулярной анизотропией. Магнитное поле ориентировано различным образом в плоскости слоя. Обнаружено большое многообразие форм доменов в зависимости от величины и ориентации внешнего поля. Показано, что форма и плотность зародышей перемагничивания оказывают существенное влияние на остаточные доменные структуры.

Пленки с полосовыми доменами привлекают внимание как материал, пригодный для записи и оптического считывания информации [1, 2]. Кроме того, в пленках пермаллоя, осажденных при больших углах падения молекулярного пучка, обнаружены цилиндрические домены [3, 4], которые также могут быть использованы для записи информации. В связи с этим представляет интерес подробное изучение доменной структуры (ДС) наклонно осажденных слоев.

Зарождение и перестройка доменной структуры в процессе перемагничивания пленки исследованы недостаточно. В работе [5] описан механизм перемагничивания наклонно осажденных слоев пермаллоя, обладающих перпендикулярной анизотропией (ось легкого намагничивания (о.л.н.) не лежит в плоскости пленки). Поле прикладывалось параллельно проекции о.л.н. на плоскость слоя (r -направление). Поскольку наклонно осажденные конденсаты проявляют существенную анизотропию в своей плоскости, можно ожидать, что механизм их перемагничивания также будет зависеть от ориентации внешнего поля H .

Целью настоящей работы явилось изучение перестройки доменной структуры под влиянием поля, приложенного в плоскости пленки, при различных углах α между H и r -направлением (рис. 1к). Такое исследование представляется интересным и с точки зрения физики магнитных явлений. Доменная структура одноосных материалов рассматривалась в ряде работ [6]. Вместе с тем отсутствуют данные о ДС ферромагнитных слоев, о.л.н. которых отклонена на значительный угол от нормали к слою. Как показали проведенные нами исследования тонких слоев магнетоплюмбита, вырезанных под углом $\sim 45^\circ$ к о.л.н. (результаты этих экспериментов будут описаны в другой статье), основные закономерности перестройки ДС монокристаллических пластин имеют место и в случае наклонно осажденных конденсатов. Однако в пленках, благодаря малой подвижности доменных границ, удается зафиксировать некоторые промежуточные ДС и объяснить образование различных форм ДС в состоянии остаточной намагниченности.

Пленки пермаллоя (83% Ni, 17% Fe) получали путем вакуумной конденсации при угле падения молекулярного пучка на подложку 70° . Перпендикулярная анизотропия в них была обусловлена столбчатыми кристаллитами, длинные оси которых составляли угол $\sim 50^\circ$ с нормалью к слою. Толщина пленок варьировалась от 0,5 до 10 мкм. Для того что-

бы исключить влияние макронапряжений на магнитные свойства, пленки отделяли от подложки. Доменную структуру изучали порошковым методом. Магнитное поле, перпендикулярное к плоскости слоя, не включалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетика перестройки доменной структуры в зависимости от угла α ориентации внешнего поля. Основные закономерности перестройки ДС в процессе перемагничивания пленки показаны в таблице и на рис. 1. Через δ обозначена плотность доменов (их количество на единицу площади пленки), H_0 — поле зарождения ДС. При изменении α от 0 до 90° можно выделить несколько характерных областей, отличающихся по механизму перемагничивания.

Перестройка доменной структуры при перемагничивании пленки

α , град	Момент зарождения			Остаточное состояние	Малые отрицательные поля	Отрицательные поля, близки к насыщению
	ДС	H_0 , э	δ , мкм^{-2}			
0	Кинжаловидные домены	75	$\sim 10^{-4}$	Полосовые домены	Полосовые и кинжаловидные домены	Наклоненные цилиндрич. домены
10	Кинжаловидные домены, на отдельных участках НЦД	75	$\sim 10^{-3}$	Полосовые домены, на отдельных участках лабиринтная ДС	То же	То же
40—50	Ряды НЦД, ориентированные в r -направлении	90	$(2-4) \cdot 10^{-2}$	Области полосовых доменов, разделенные макрограницами	»	»
60	Отдельно расположенные НЦД, видна тенденция к ориентации их в r -направлении	150	$6 \cdot 10^{-2}$	Короткие полосовые домены, на отдельных участках НЦД	Полосовые домены, ориентированные в r -направлении	»
70	Отдельно расположенные НЦД	180	0,1	НЦД	То же	»
90	Нерегулярная полосовая ДС	~ 300	—	Нерегулярная полосовая ДС	Нерегулярная полосовая ДС	Нерегулярная полосовая ДС

1. $\alpha=0$. Механизм перемагничивания пленки в r -направлении ($\alpha=0$) подробно описан в [5]. Его главной особенностью является образование кинжаловидных доменов, вытянутых в r -направлении, и смещение границ между доменами.

2. $\alpha \approx 10^\circ$. На рис. 1а показаны порошковые фигуры в момент зарождения доменной структуры. Поле было уменьшено от $H > H_s$ (H_s — поле насыщения) до порогового значения H_0 . Как видно, кроме кинжаловидных, образуются короткие домены, несколько вытянутые в r -направлении. Исследования порошковых фигур с двух сторон конденсата показали, что указанные домены проходят через всю толщину пленки. В поперечном сечении слоя выявляются границы, отклоненные от нормали на угол $\sim 50^\circ$. В связи с этим такие домены можно считать наклоненными цилиндрическими доменами (НЦД). При уменьшении поля от НЦД прорастают короткие полосы с ориентацией, близкой к полю (рис. 1б), которые сохраняются в состоянии остаточной намагниченно-

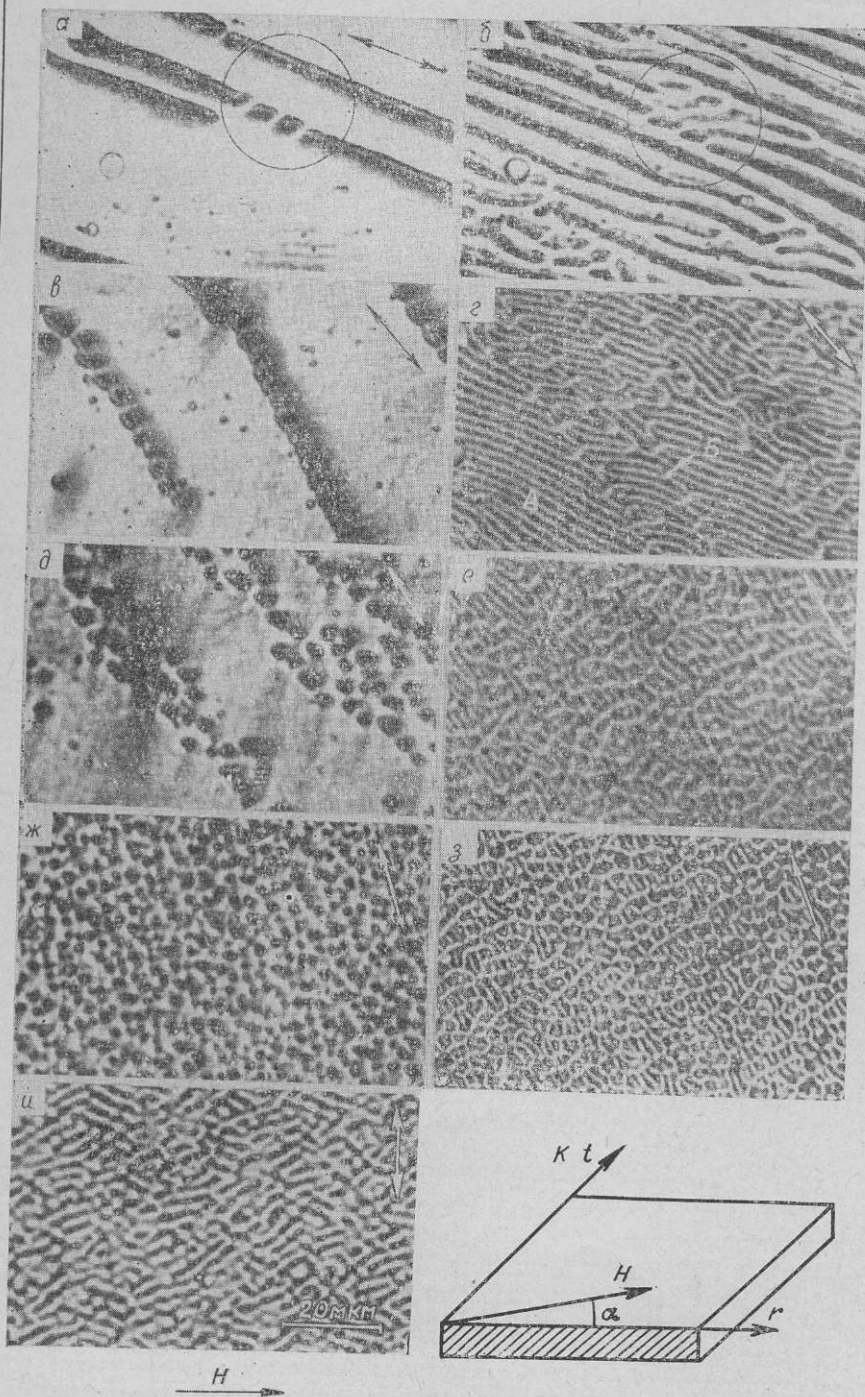


Рис. 1. Порошковые фигуры, наблюдаемые при перемagnetивании пленки толщиной 3 мкм:
 $a - \alpha = 10^\circ, H = H_0$; $b - \alpha = 10^\circ, H < H_0$; $в - \alpha = 50^\circ, H = H_0$; $г - \alpha = 50^\circ, H = 0$; $д - \alpha = 60^\circ, H = H_0$; $e - \alpha = 60^\circ, H = 0$; $ж - \alpha = 70^\circ, H = H_0$; $з - \alpha = 70^\circ, H = 0$; $и - \alpha = 90^\circ, H = 0$; $к$ - схема, поясняющая ориентацию магнитного поля относительно проекции r оси легкого намагничивания на плоскость пленки (направление r указано стрелками); t - ось трудного намагничивания.

сти и образуют лабиринтную ДС на отдельных участках пленки. В отрицательных полях перестройка ДС в основном происходит так же, как и в случае $\alpha=0$ [5].

Отметим одну особенность, которая не описана в работе [5]. Вблизи насыщения в отрицательном поле кинжаловидные домены укорачиваются и ДС переходит в систему НЦД, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. При $H = -H_0$ НЦД коллапсируют. Эта закономерность характерна для всех углов α — от 0 до значений, близких к 90° (см. таблицу). С ростом α интервал H , в котором реализуется структура НЦД, увеличивается. Указанный момент представляется нам важным с точки зрения практического применения НЦД для записи информации.

3. $\alpha=40-50^\circ$. Вместо кинжаловидных доменов в момент зарождения доменной структуры возникают ряды НЦД, ориентированные в r -направлении (рис. 1в). При уменьшении поля образуются новые ряды НЦД, одновременно от одного ряда НЦД до соседнего прорастают полосовые домены. В состоянии остаточной намагниченности (рис. 1г) структура состоит из областей A регулярно расположенных полос и макрограниц B . Как показали более подробные исследования, в районе макрограницы полосовые домены с одинаковой нормальной компонентой намагниченности сдвинуты относительно друг друга на полпериода. При включении отрицательного поля полосовые домены на отдельных участках границы сливаются, в результате чего возрастает регулярность ДС. Полосы ориентируются в направлении поля, наблюдается смещение границ между доменами.

4. $\alpha=60^\circ$. В момент зарождения доменной структуры НЦД обособлены друг от друга, хотя и заметна тенденция к расположению их вдоль r -направления (рис. 1д). При уменьшении поля плотность доменов резко возрастает, вследствие чего прорастающие от НЦД полосы оказываются короткими. В состоянии остаточной намагниченности часть пленки заполнена НЦД (рис. 1е). В отрицательном поле НЦД сливаются в полосы, ориентированные близко к r -направлению.

5. $\alpha=70^\circ$. В момент зарождения доменной структуры возникают беспорядочно расположенные НЦД (рис. 1ж). При уменьшении поля размеры НЦД несколько возрастают, а δ почти не изменяется. В состоянии остаточной намагниченности реализуется структура плотноупакованных НЦД (рис. 1з), хотя и менее регулярная, чем сотовая. В отрицательном поле НЦД сливаются в полосы, ориентированные в r -направлении, которые затем, укорачиваясь, переходят в структуру отдельно расположенных НЦД.

6. $\alpha=90^\circ$. Зарождается весьма нерегулярная полосовая структура, которая сохраняется в состоянии остаточной намагниченности (рис. 1и) и в отрицательном поле.

Резюмируя наблюдения, описанные в п.п. 1—6 и представленные в таблице, отметим следующие особенности перестройки доменной структуры, которые, на наш взгляд, определяют характер остаточных структур: а) с ростом α увеличивается плотность δ зарождающихся доменов; б) в положительных полях практически отсутствует слияние НЦД в более крупные НЦД или полосы, а прорастающие от ряда НЦД кинжаловидные домены не сливаются с НЦД соседнего ряда; в) по мере увеличения α растет поле зародышеобразования H_0 .

Доменная структура в состоянии остаточной намагниченности. На рис. 2 представлена диаграмма существования различных ДС в состоянии остаточной намагниченности ($\alpha-T_H$ диаграмма). В качестве независимых переменных выбраны: угол α ориентации поля и физико-техноло-

гический параметр — температура $T_{\text{п}}$ подложки при осаждении пленки. Температура подложки оказывает существенное влияние на кристаллическую структуру конденсата: с ростом ее структура совершенствуется, вследствие чего уменьшается константа перпендикулярной анизотропии и увеличивается подвижность междоменных стенок.

Приведенная диаграмма разбивается на несколько областей. Область *I* соответствует полосовой доменной структуре. В области *II* реализуется структура плотноупакованных НЦД (рис. 1з). В переходной области *I+II* в состоянии остаточной намагниченности присутствуют полосовые и НЦД (рис. 1е). Область *III*, прилежащая к оси трудного

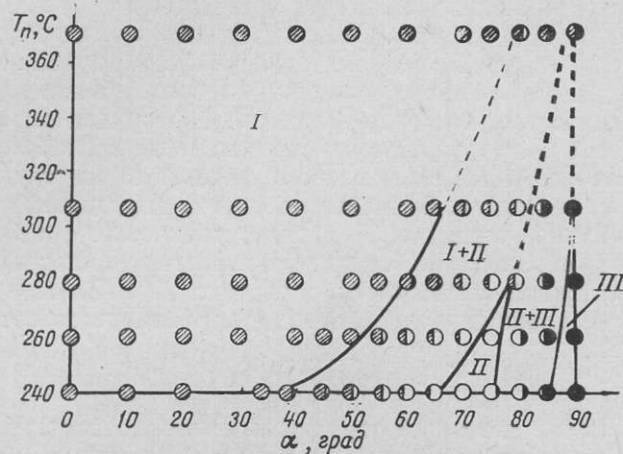


Рис. 2. $\alpha - T_{\text{п}}$ диаграмма существования доменных структур в остаточном состоянии.

намагничивания, представляет собой нерегулярную полосовую структуру, образующуюся вследствие некогерентного вращения векторов намагниченности при уменьшении поля от H_0 до 0 (рис. 1и). Между *II* и *III* областями имеется переходная область *II+III*, в которой в остаточном состоянии сосуществуют НЦД и нерегулярная полосовая структура.

Из приведенной диаграммы следует, что по мере увеличения $T_{\text{п}}$ сужается область существования НЦД в состоянии остаточной намагниченности; в то же время расширяется область *I*, в которой перемагничивание происходит путем роста кинжаловидных доменов. Аналогичные закономерности наблюдаются при уменьшении толщины конденсата, хотя толщина пленки оказывает меньшее влияние на кинетику перестройки доменной структуры, чем $T_{\text{п}}$.

Переходя к обсуждению описанных экспериментальных данных, будем исходить из следующих предпосылок: а) в плоскости пленки имеется предпочтительное r -направление, вдоль которого энергетически выгодна ориентация междоменных границ в отсутствие поля; б) при включении поля под углом $\alpha \neq 0$ вектор намагниченности отклоняется от r -направления и под действием вращательной анизотропии стенки стремятся расположиться параллельно намагниченности.

Рассмотрим для примера возможный механизм образования остаточной ДС, представленной на рис. 1г. В поле H_0 наблюдается тенденция к образованию кинжаловидных доменов, стенки которых параллельны r -направлению. Этому препятствует вращательная анизотропия, способствующая ориентации границ вдоль поля, то есть под углом α к r -направлению. В результате кинжаловидный домен распадается на ряд

удлиненных НЦД. Дальнейшее изменение доменной структуры при уменьшении H диктуется вращательной анизотропией: от НЦД прорастают кинжаловидные домены, ориентированные между r -направлением и внешним полем. Как указывалось выше, эти домены не сливаются с соседним рядом НЦД, поэтому в состоянии остаточной намагниченности образуются макрограницы типа B (рис. 12), разделяющие области с полосовой структурой.

С увеличением α , то есть при приближении к оси трудного намагничивания, растет плотность зародышей δ (см. таблицу). Такая же закономерность наблюдалась нами на тонких кристаллах магнетоплюмбита, вырезанных под углом $\sim 45^\circ$ к о.л.н. Согласно [7], для монокристаллов с осью c , перпендикулярной плоскости пластины, δ увеличивается по мере отклонения поля от о.л.н. Это объясняется уменьшением энергетического барьера, создаваемого анизотропией при образовании зародышей. Такое объяснение вполне применимо к исследованным нами объектам. В согласии с тем, что энергетический барьер для образования зародыша с ростом α падает, находится увеличение положительного поля зародышеобразования H_0 по мере приближения к оси трудного намагничивания (см. таблицу). Большая плотность зародышей и невозможность их слияния вследствие магнитоэлектронного взаимодействия обуславливают образование структуры плотноупакованных НЦД в состоянии остаточной намагниченности (рис. 13). В совершенных же кристаллах, где границы более подвижны, реализуется сотовая доменная структура.

ВЫВОДЫ

1. Исследование доменной структуры наклонно осажденных пленок пермаллоя в процессе их перемагничивания обнаружило большое многообразие форм доменов в зависимости от величины и ориентации внешнего магнитного поля.

2. При увеличении угла α между проекцией о.л.н. на плоскость пленки и внешним полем наблюдаются следующие формы доменов в момент зародышеобразования. При $\alpha=0$ возникают кинжаловидные домены. С ростом α образуются ряды наклоненных цилиндрических доменов, затем система отдельно расположенных НЦД и полосовая доменная структура.

3. Форма и плотность зародышей перемагничивания оказывают влияние на остаточные доменные структуры. В частности, образованию структуры плотноупакованных НЦД способствует высокая плотность зародышей и магнитоэлектронное взаимодействие между ними.

Харьковский политехнический институт
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию
в окончательном варианте
18 января 1974 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюкин Л. М., Степанов Б. М., Фабриков В. А., Хромов А. В. Фотографирование на магнитные пленки, М., Атомиздат, 1971.
2. Кринчик Г. С., Чепурова Е. Е., Бакрадзе О. И. Авт. свид. № 277862. Бюлл. изобр., 1970, № 25.
3. Ruchalska I. B., Jones G. A. J. Phys. D: Appl. Phys., 1973, 6, L52.
4. Палатник Л. С., Лубяный Л. З., Лукашенко Л. И. ФТТ, 1973, 15, 600.
5. Палатник Л. С., Лукашенко Л. И., Золотницкий Ю. В. ФММ, 1973, 35, 78.
6. Кандаурова Г. С. Труды ин-та электронных управляющих машин, вып. 12, М., 1971, стр. 38.
7. Кандаурова Г. С. Автореф. докт. дисс., Свердловск, ИФМ УНЦ АН СССР, 1973.