

Л. В. КИРЕНСКИЙ, С. В. КАН и И. Ф. ДЕГТЯРЕВ

**ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ  
МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА КЕРРА**

Магнитооптические методы наблюдения доменной структуры массивных образцов, основанные на применении эффекта Керра, разработаны сравнительно недавно [1, 2].

Покрывая образцы слоем диэлектрика или полупроводника, можно осуществить визуальное наблюдение доменной структуры [3, 4].

Используя трудный фотографический метод совмещения, в последние годы были проведены некоторые важные исследования магнитной структуры тонких пленок [5].

В 1959 г. вышла статья Праттона [6], в которой описывается методика и схема установки для визуального наблюдения доменной структуры на ферромагнитных пленках. Каких-либо существенных данных о поведении доменов в статье приведено не было. Исследование доменной структуры магнитооптическими методами проведено далеко недостаточно. Имеющиеся в литературе сведения о доменной структуре тонких пленок в основном были получены порошковым методом, который обладает рядом существенных недостатков.

1. Разрешающая способность этого метода в некоторых случаях ограничивается размерами частиц порошка. Например, ширину порошковой линии нельзя считать равной ширине граничного слоя между доменами, поскольку размеры частиц соизмеримы или даже могут быть больше толщины исследуемой ферромагнитной пленки. Трудно сказать, в какой степени полученные фигуры отображают истинную магнитную структуру пленки.

2. С помощью порошковых фигур невозможно обнаружить междоменные границы Нееля из-за отсутствия составляющей магнитного поля рассеивания вдоль нормали к поверхности пленки.

3. Трудно наблюдать динамику быстрых процессов перестройки доменной структуры из-за инертности частиц.

4. Порошковый метод применим в узком интервале температур, который определяется точками замерзания и кипения суспензии.

Представляет значительный интерес изучение магнитной структуры тонких ферромагнитных пленок другими методами, поскольку они могут оказаться свободными от некоторых или даже всех указанных выше недостатков. В настоящей работе изучена магнитная структура тонких ферромагнитных пленок методом продольного магнитооптического эффекта Керра.

**Образцы и методика эксперимента**

Наблюдение доменной структуры проводилось на тонких ферромагнитных пленках, полученных в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст. напылением сплава, содержащего 17 % Fe, 80 % Ni, 3 % Mo, на нагретые до  $350^{\circ}$  С полированные стеклянные подложки. Для создания одноосной магнитной анизотро-

ции при получении пленки прикладывалось магнитное поле напряженностью 100 Ое, направленное параллельно поверхности подложки.

Для визуального наблюдения и фотографирования доменов на ферромагнитную пленку, нагретую до 250°, напылялся в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст. тонкий диэлектрический слой сернистого цинка. Чтобы уменьшить расстраивающее действие температуры на анизотропию пленки, во время напыления слоя сернистого цинка прикладывалось магнитное поле

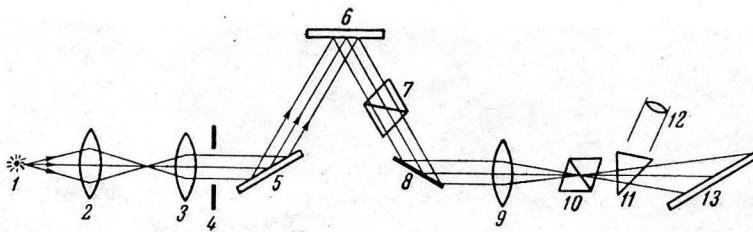


Рис. 1. Схема оптической части установки. 1 — источник света, 2 — конденсор, 3 — коллиматор, 4 — диафрагма, 5 и 6 — зеркала, 7 — поляризатор, 8 — образец, 9 — объектив, 10 — анализатор, 11 — призма, 12 — зрительная труба, 13 — фотопластина

напряженностью 70 Ое, параллельное тому направлению, вдоль которого прикладывалось поле при испарении металла. Слой диэлектрика значительно увеличивает угол поворота плоскости поляризации света, в результате чего контраст между смежными доменами настолько возрастает, что можно вести их визуальное наблюдение. Наиболее четкие фигуры наблюдались при покрытии ферромагнитной пленки слоем сернистого цинка такой толщины, что он имел светло-коричневую окраску. При повторном исследовании образца через три месяца изменений поведения доменов и слоя сернистого цинка обнаружено не было.

Наблюдение доменной структуры проводилось на пленках, имеющих форму прямоугольника размерами  $8 \times 36$  мм и диска диаметром от 2 до 8 мм. Поле визуального наблюдения и фотографирования на прямоугольных пленках ограничивалось центральной областью  $7 \times 5$  мм. Толщина ферромагнитных пленок определялась оптическим методом с помощью линий равного хроматического порядка [7].

Экспериментальная установка была собрана на базе металлографического микроскопа МИМ-8М. Схема оптической части установки приведена на рис. 1. Так как микроскоп МИМ-8М собран на прямом рельсе, а для обнаружения продольного эффекта Керра требуется наклонное падение света, были использованы зеркала (5 и 6), направляющие свет на поверхность образца под углом 60°. Предметный столик, на котором укреплялся образец, был устроен так, что образец мог перемещаться параллельно самому себе в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вращаться вокруг оси, перпендикулярной поверхности образца. Было предусмотрено также вращательное движение электромагнита, с помощью которого на образец накладывалось магнитное поле.

Поляризованный свет, проходя через объектив 9 и анализатор 10, отражался от зеркальной грани призмы 11 и попадал в зрительную трубу 12, которая служила для визуального наблюдения фигур.

При фотографировании призма с помощью тросяка отводилась в сторону, и свет направлялся на фотопластину 13, которая устанавливалась наклонно для получения резкого изображения фигур. Фотографирование обычно проводилось при пятикратном увеличении, визуальное же наблюдение, меняя окуляры, можно было вести при увеличении, достигающем до  $30 \times$ .

### Результаты наблюдений

Магнитные свойства разных партий пленок, полученных при одинаковых условиях, оказываются различными. Это обусловлено влиянием на магнитные свойства пленок ряда факторов, которые пока не контролируются при испарении металлов.

Направление осей легкого и трудного намагничивания определялось наблюдением доменной структуры, которая устанавливается на размагни-

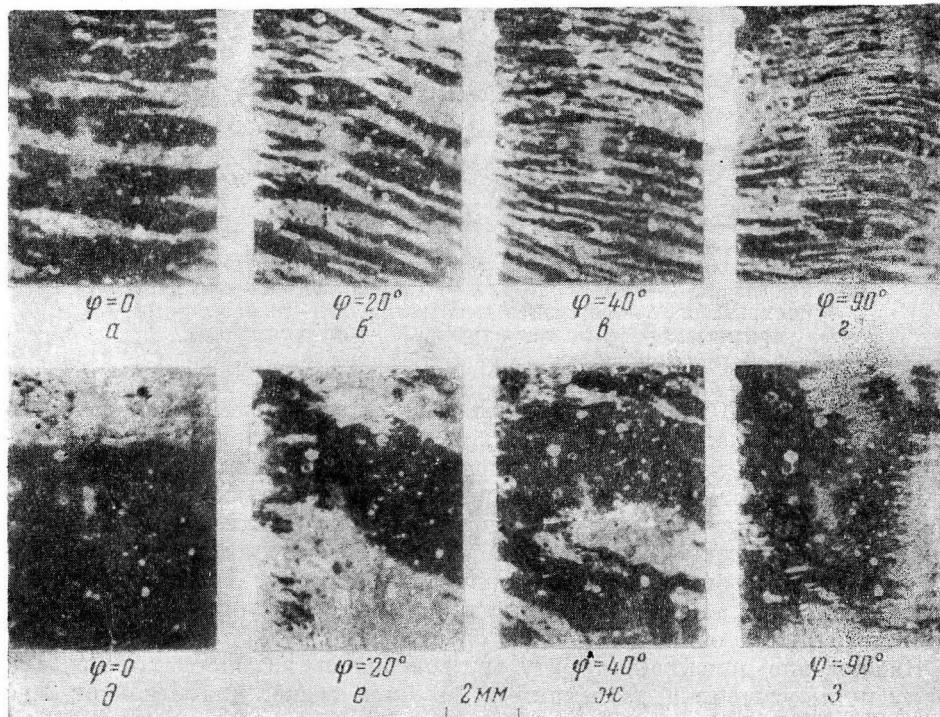


Рис. 2. Фигуры на пленке толщиной  $580^{\circ}\text{A}$ , полученные при разных условиях размагничивания. Ось легкого намагничивания горизонтальна

ченных пленках. При прочих равных условиях, домены при размагничивании вдоль оси легкого намагничивания принимают форму вытянутых образований, с параллельными краями и увеличиваются в размерах.

При наложении постепенно возрастающего постоянного поля под углом  $90^{\circ}$  к предварительно определенному направлению легкого намагничивания наблюдается уменьшение контраста между смежными доменами без заметного изменения их конфигураций (в случае правильного определения направления оси) или же рост более выгодно ориентированных доменов (в случае неточного определения направления). Сочетая оба способа, в каждой пленке можно сравнительно правильно определить направления осей.

#### Влияние условий размагничивания на доменную структуру

Пленки, полученные в магнитном поле, обычно остаются насыщенными, и без последующего размагничивания доменная структура не обнаруживается. Размагничивание производилось переменным убывающим полем.

На рис. 2 приведены фотографии одного и того же участка пленки при размагничивании под разными углами к оси легкого намагничивания и при

разных скоростях уменьшения размагничивающего поля. По литературным данным [5], очень тонкие пленки обычно представляют трудно размагничиваемые однодоменные образцы. Данная же пленка, имея толщину 580 Å, легко размагничивалась, что, очевидно, обусловлено ее неоднородностью. О неоднородности этой пленки можно судить по характеру изменения магнитной структуры при намагничивании, что будет показано ниже. С увеличением угла между направлением размагничивающего поля и осью легкого намагничивания при медленном размагничивании фигуры становятся

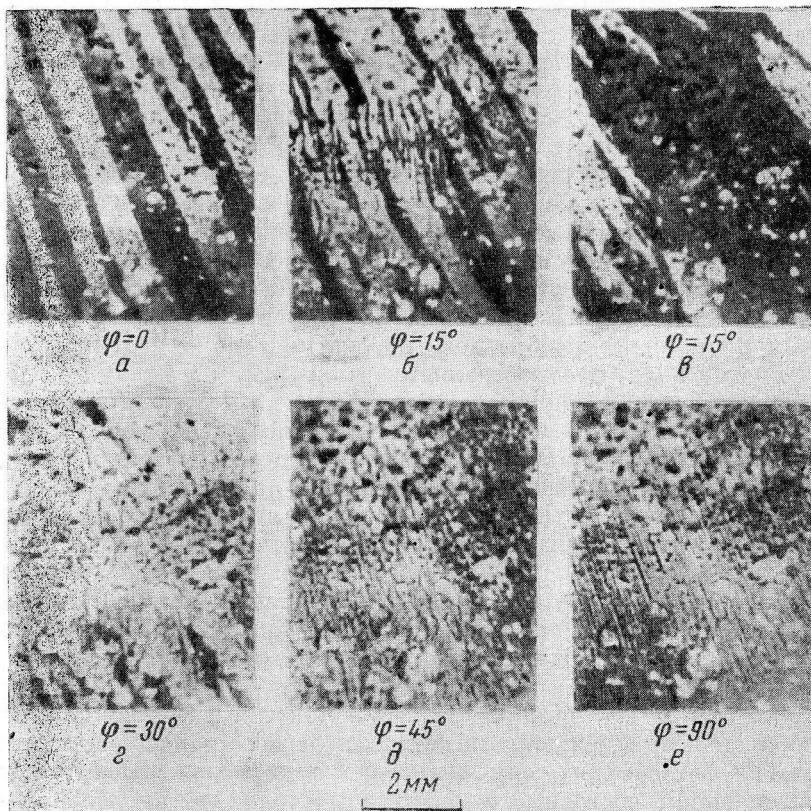


Рис. 3. Фигуры на пленке толщиной 1100 Å, полученные при размагничивании под разными углами

полее мелкими, изломанными и беспорядочными (рис. 2, *a*—*e*) и могут приобретать небольшой наклон (рис. 2, *b*, *c*, *e*, *ж*) к направлению оси легкого намагничивания. Подобное поведение доменов наблюдалось на многих пленках. При быстром размагничивании со скоростью убывания поля примерно 100 Ое сек<sup>-1</sup> фигуры имеют значительно большие размеры (рис. 2, *д*—*з*), чем при медленном ( $\sim 0,6$  Ое сек<sup>-1</sup>) размагничивании (рис. 2 *а*—*е*). Это было обнаружено на всех пленках. Сильное влияние условий размагничивания на конфигурацию доменов видно из рис. 3. Фотографии, приведенные на этом рисунке (кроме *е*), получены при медленном размагничивании. При  $\varphi = 15^\circ$  антипараллельные домены в средней части образца дробятся на мелкие фигуры (рис. 3, *б*), которых нет при быстром размагничивании в том же направлении (рис. 3, *в*). По мере возрастания угла  $\varphi$  процесс дробления доменов усиливается и распространяется к краям пленки. На рис. 3, *г* на противоположных краях еще видны сравнительно крупные темные фигуры. В интервале углов  $45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  на всей пленке об-

наруживается мелкая, беспорядочная и слабоконтрастная структура. Следует отметить, что при размагничивании вдоль оси трудного намагничивания устанавливается структура, состоящая из мелких прямых полос, параллельных оси легкого намагничивания (рис. 3, *е*). Фигуры, приведенные на рис. 3 (кроме *в*), удовлетворительно воспроизводятся при повторном размагничивании.

#### Изменение доменной структуры пленок при намагничивании

На рис. 4 (оборот вклейки II к стр. 583) показано шесть этапов процесса намагничивания пленки толщиной 580 Å в направлении оси легкого намагничивания.

При наложении возрастающего поля доменная структура в широком интервале полей (от 0 до 6 Ое) не претерпевает никаких видимых изменений. При напряженности поля, несколько превышающей 6 Ое, домены, намагниченные вдоль поля (светлые фигуры), начинают мелкими скачками поглощать антипараллельные домены (темные фигуры). Этот процесс поглощения начинается у верхнего правого края пленки, и при достижении напряженности поля 6,4 Ое внезапным скачком перемагничивается значительная часть верхнего домена (рис. 4, *б*). При дальнейшем возрастании поля процесс скачкообразного перемагничивания доменов, намагниченных против поля, распространяется вниз (рис. 4, *в—е*), что, по-видимому, указывает на неоднородность пленки по толщине. На рис. 4, *е* в нижнем левом углу видны маленькие неперемагнитившиеся островки, на которых границы доменов испытывают сильное торможение. Это, очевидно, обусловлено наличием включений.

Характерной особенностью данной пленки является то, что на ней не наблюдается видимых смещений границ.

Совершенно иная картина наблюдается при намагничивании однородной пленки толщиной 800 Å. Размагнитить данный образец в направлении оси легкого намагничивания удавалось с большим трудом. Чаще эта пленка проявляла себя как однодоменный образец, сохраняя состояние насыщения.

На рис. 5 (оборот вклейки II к стр. 583) показан процесс намагничивания этой пленки под разными углами  $\phi$  к оси легкого намагничивания (светлые пятна на фотографиях получены из-за дефектов слоя сернистого цинка). В размагниченном состоянии структура состояла из антипараллельных доменов (рис. 5, *а, г, ж*), приблизительно ориентированных вдоль направления легкого намагничивания, независимо от направления размагничивания (в направлении легкого намагничивания редко устанавливается структура из прямых антипараллельных доменов). Как видно из тех же рисунков, с увеличением угла доменная структура становится более мелкой.

Процесс намагничивания осуществляется путем видимого плавного смещения границ (рис. 5, *а—е*). Это особенно хорошо заметно при сравнении рис. 5, *г* и *д*; домены, намагниченные против поля (темные фигуры), стали более узкими, чем те же домены в отсутствие поля. При увеличении угла от 0 до 80° общий характер процесса намагничивания не изменяется, только смещение границ осуществляется более плавно и в более сильных полях. В направлении трудного намагничивания смещения границ не наблюдается. По мере возрастания поля уменьшается контраст между смежными доменами, а их конфигурация не изменяется, что, по-видимому, обусловлено вращением вектора намагченности  $I_s$  внутри доменов [6]. Когда величина поля достигла 6,5 Ое, фигур почти не было заметно, но при снятии поля установилась структура, приведенная на рис. 5, *з*, отличающаяся от начальной (рис. 5, *ж*) тем, что темные полоски стали короче у правого края пленки. При снятии поля, достигшего 20 Ое, обнаруживается совершенно другая и менее контрастная структура (рис. 5, *и*), которая почти не изменяется при снятии поля, достигавшего 500 Ое.

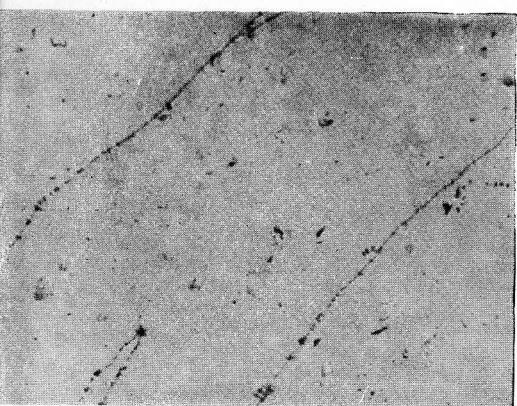


Рис. 1

Рис. 1. Доменная структура на пленке кремнистого железа толщиной 1000 Å. 250 ×  
с. 3. Образование порошковых фигур на механических повреждениях и включениях в пермаллоевой  
пленке толщиной 2500 Å. 250 ×

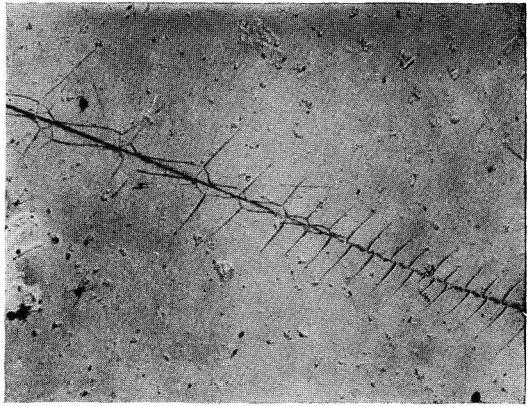
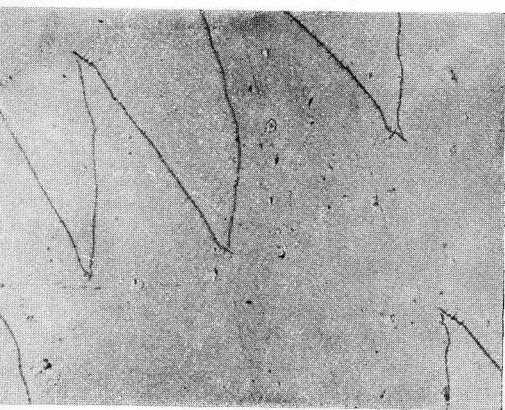
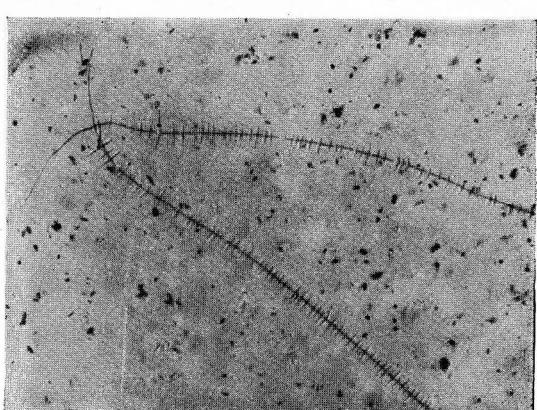


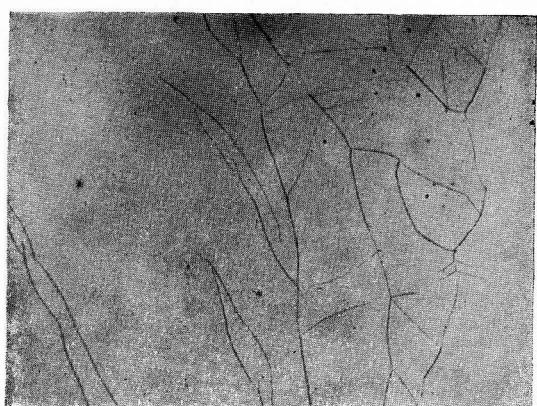
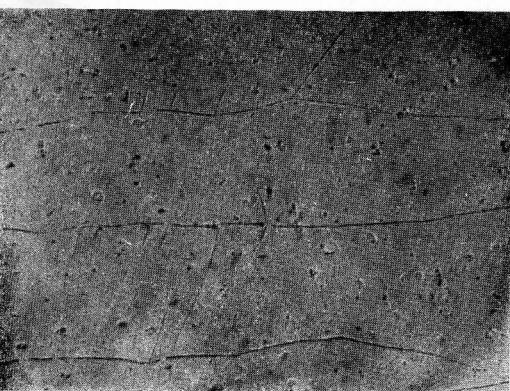
Рис. 3



а



б



в

Рис. 2. Порошковые фигуры на пленках молибденового пермаллоя: а — 800 Å; б — 1200 Å;  
в — 2500 Å; г — 3000 Å. 250 ×

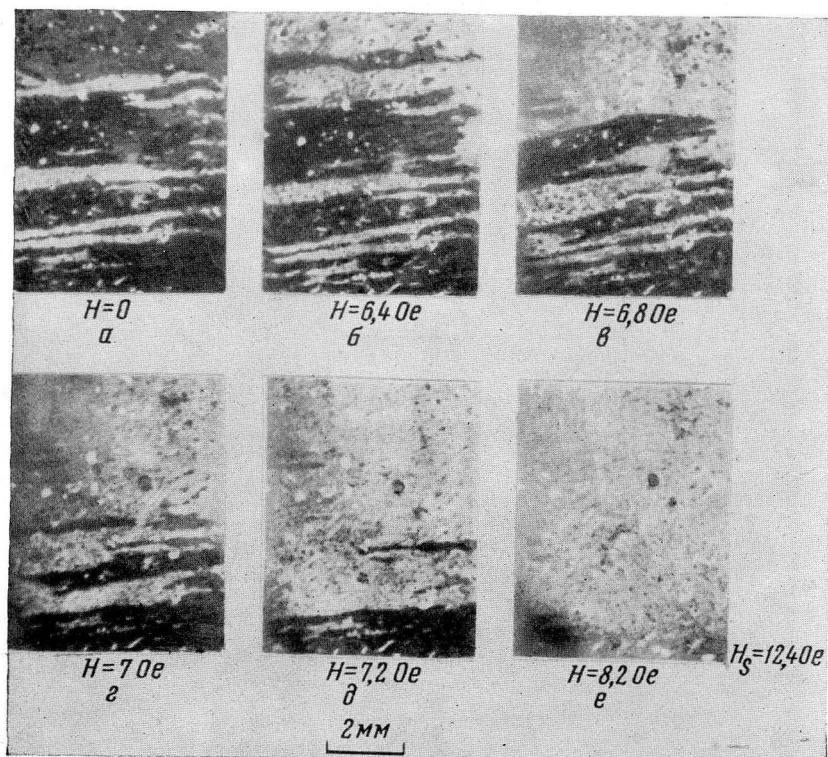


Рис. 4. Процесс намагничивания пленки толщиной 580 Å в направлении оси легкого намагничивания (горизонтальной).  $H_s$  — поле насыщения

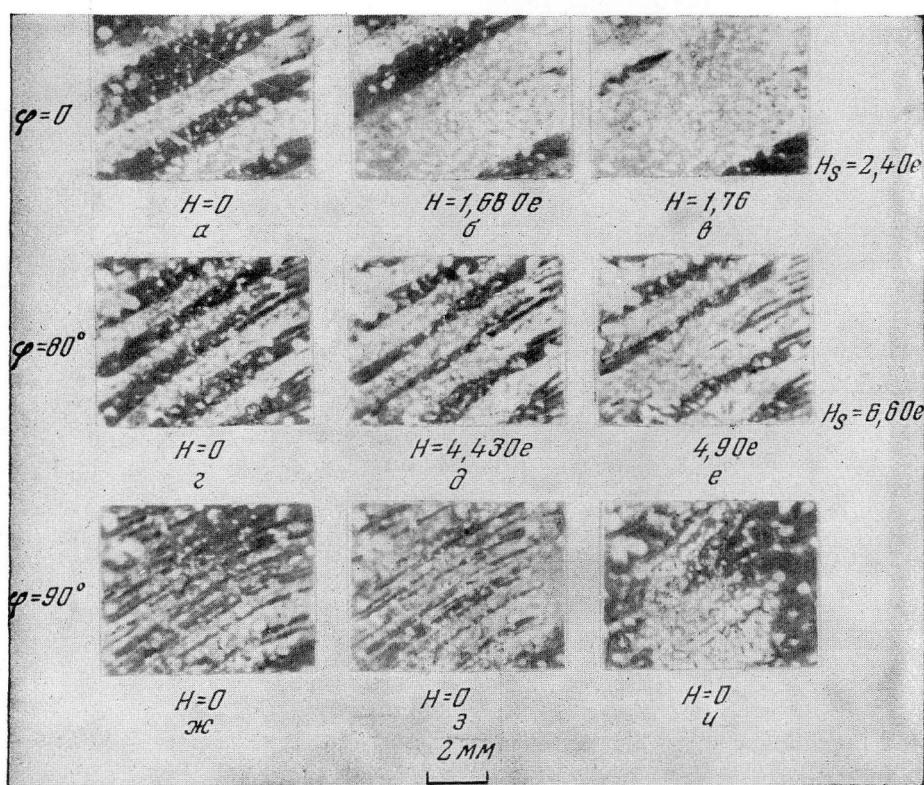


Рис. 5. Процесс намагничивания пленки толщиной 800 Å под разными углами к оси легкого намагничивания

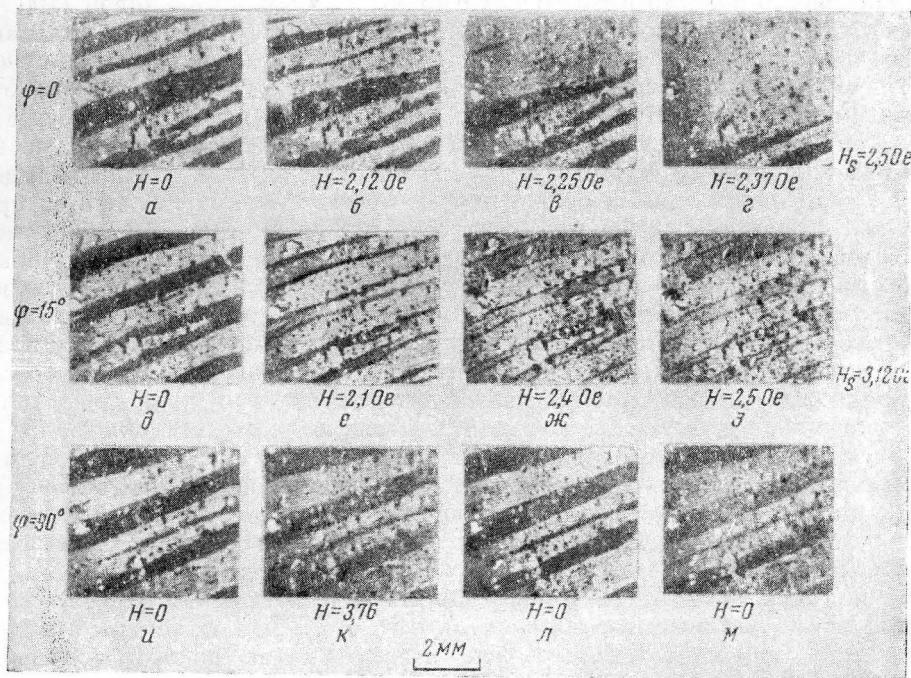


Рис. 6. Процесс намагничивания пленки толщиной 1100 Å под разными углами к оси легкого намагничивания, которая приблизительно совпадает с направлением фигур на фотографии *a*

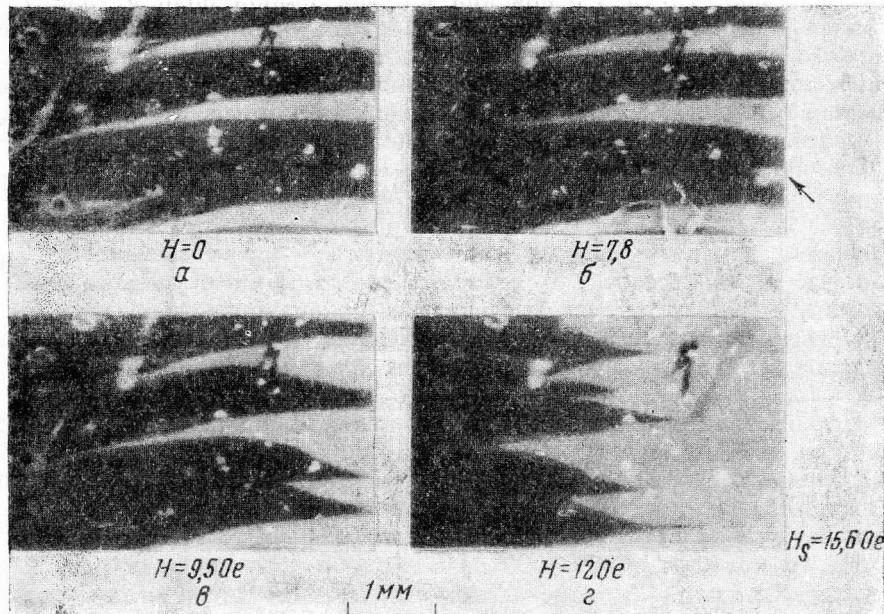


Рис. 7. Процесс намагничивания пленки толщиной 1750 Å в направлении оси легкого намагничивания

На рис. 6 показан процесс намагничивания пленки толщиной 1100 Å. При размагничивании в направлении легкого намагничивания устанавливается структура из прямых антипараллельных доменов (рис. 6, *a*, *д*, *и*). Процесс намагничивания в направлениях, близких к оси легкого намагничивания, осуществляется примерно так же, как и на предыдущей пленке. При значениях угла  $\phi$ , близких к  $45^\circ$ , процесс намагничивания носит совершенно иной характер. При постепенном возрастании поля наблюдается просветление темных полос, причем просветление начинается внутри домена с середины и плавно распространяется к краям, в результате чего вместо темной полосы получаются две темные линии, разделенные светлым промежутком (рис. 6, *е*). С увеличением поля этот процесс продолжается и линии становятся более тонкими (рис. 6, *ж*, *з*). При определенном значении поля напряженности  $H$  линии исчезают и при снятии поля не восстанавливаются. Следует отметить, что конфигурация доменов совершенно не изменяется, а при изменении направления поля на противоположное наблюдается аналогичная картина со светлыми полосами.

При намагничивании вдоль направлений, близких к оси трудного намагничивания, происходит уменьшение (выравнивание) контраста фигур, т. е. темные фигуры несколько светлеют, а светлые — темнеют, форма же доменов не изменяется. Это легко заметить, сравнивая рис. 6, *и* и *к*. При снятии поля контраст между доменами восстанавливается (рис. 6, *л*). Когда величина поля достигла 18 Ое, фигуры почти не было заметно, но после снятия поля фигуры опять восстановились (рис. 6, *м*), только контраст между смежными доменами стал слабее. После снятия поля, достигшего 100 Ое, фигуры не восстанавливаются.

На рис. 7 показан процесс намагничивания вдоль оси легкого намагничивания участка пленки толщиной 1750 Å, имеющей форму диска диаметром 6 мм.

На данной пленке при ее намагничивании преобладающую роль играют возникновение и рост выгодно ориентированных доменов в виде клиньев. Так, при поле 7,8 Ое у основания нижней темной полосы (рис. 7, *б*) на правом краю возникает зародыш обратной намагниченности в виде маленького светлого клина, отмеченного стрелкой. С увеличением поля увеличиваются размер и количество клиньев, которые растут плавным смещением границ (рис. 7 *в*, *г*) в сторону вершин клиньев. При увеличении угла клинья становятся более мелкими и несколько наклоненными к направлению поля.

### Выводы

Изучение доменной структуры тонких ферромагнитных пленок показало, что на их магнитную структуру сильно влияют условия размагничивания, причем установлены следующие закономерности.

1. С увеличением угла между направлением размагничивания и осью легкого намагничивания устанавливается более мелкая доменная структура.

2. При быстром размагничивании, как правило, обнаруживается структура, состоящая из крупных доменов, имеющих часто самые различные и неопределенные формы. При медленном размагничивании устанавливается более мелкая и сравнительно правильная доменная структура.

При изучении процесса намагничивания установлено.

1. На тонких (около 500—600 Å) и неоднородных пленках рост доменов, более выгодно ориентированных относительно приложенного поля, осуществляется скачкообразно без плавного смещения границ.

2. С увеличением толщины пленок и угла между магнитным полем и осью легкого намагничивания и с улучшением однородности пленок смещение границ происходит, как правило, более плавно. При намагничивании в направлении трудного намагничивания конфигурация доменов не изменяется, но постепенно сглаживается контраст между смежными доме-

нами, который исчезает по достижении насыщения. При снятии поля контраст между доменами частично восстанавливается.

3. При наложении поля под углом  $\varphi = 45^\circ$  наблюдается просветление темных полос (или потемнение светлых полос), которое начинается с середины доменов и распространяется к краям (к границам), образуя две линии, совпадающие с границами.

Институт физики Сибирского отделения

Академии наук СССР

Красноярский гос. педагогический институт

### Литература

1. Williams H. J., Foster F. A., Wood E. A., Phys. Rev., **82**, 119 (1951).
2. Fowler C., Jr., Fryer E., Phys. Rev., **94**, 52 (1954).
3. Киренский Л. В., Дегтярев И. Ф., Ж. эксперим. и теор. физ., **35**, 3(9), 584 (1958).
4. Kranz I., Drechsel W., Z. Phys., **150**, 632 (1958).
5. Fowler C., Jr., Fryer E., Stevens T., Phys. Rev., **104**, 645 (1956).
6. Prutton M., Philos. Mag., **4**, 45, 1063 (1959).
7. Шляревский И. Н., Оптика и спектроскопия, **5**, 5, 617 (1958).