

УДК 548.538

Л. В. КИРЕНСКИЙ, В. Г. ПЫНЬКО и И. С. ЭДЕЛЬМАН

ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ ТОНКИХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗА

1. Получение и кристаллическая структура пленок

Исследовано перемагничивание монокристаллических железных пленок, выращенных на NaCl, имеющих две равноденные оси легкого намагничивания. Объясняются процессы, происходящие при перемагничивании пленок в различных направлениях и при перемагничивании с одновременным наложением постоянного поперечного поля.

Железные пленки в виде мозаичного монокристалла были получены распылением железа в вакууме $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. из вольфрамового тигля и конденсацией полученного пара на свежем сколе NaCl без приложения внешнего магнитного поля [1-3]. В зависимости от условий напыления

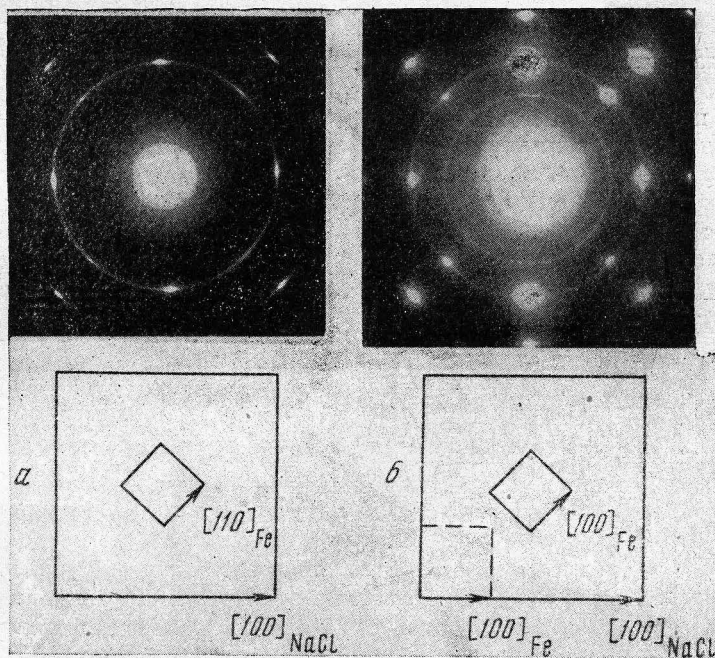


Рис. 1. Электрограммы пленок

а — пленка железа, напыленная при температуре подложки 250°C ;
 б — пленка, напыленная при температуре 400°C ; внизу — схемы ориентации пленок относительно кристалла NaCl

пленки получались либо с одной преимущественной ориентацией кристаллов, либо с двумя. В диапазоне температур $250-300^\circ\text{C}$ иногда

наблюдается преимущественно один тип эпитаксии, а именно $(100)_{\text{Fe}} \parallel (100)_{\text{NaCl}}$, $[100]_{\text{Fe}} \parallel [110]_{\text{NaCl}}$. Однако при указанных температурах значительная часть вещества отлагается также и в виде беспорядочно ориентированных кристаллитов, что видно из рис. 1, а, на котором представлена электронограмма пленки, снятая при нормальном падении электронного пучка. Несмотря на наличие в пленке беспорядочной ориентации, она обладает ярко выраженной двухосной магнитной анизотропией.

При температурах подложки выше 300°C количество кристаллитов беспорядочной ориентации сокращается, однако наряду с упомянутой выше эпитаксией становится заметной эпитаксия типа $(100)_{\text{Fe}} \parallel (100)_{\text{NaCl}}$, $[100]_{\text{Fe}} \parallel [100]_{\text{NaCl}}$. На рис. 1, б приведена электронограмма пленки, напыленной на свежий скол NaCl при температуре $\sim 400^{\circ}\text{C}$. Как видно из электронограммы и из петель гистерезиса, о которых будет сказано ниже, в пленке по-прежнему преобладает ориентация первого типа $[100]_{\text{Fe}} \parallel [110]_{\text{NaCl}}$, вследствие чего оси легкого намагничивания пленки совпадают с направлениями $[110]$ подложки. Рисунки под электронограммами 1, а, б показывают преимущественные ориентации кристаллитов железа в пленке относительно кристалла подложки.

Если напыление производить на скол NaCl, предварительно «загрязненный» отжигом тигля, то никакой преимущественной ориентации в пленках не замечается. Одновременно с пленками на NaCl получались пленки на стеклянных подложках.

2. Перемагничивание пленок

На установке, использующей магнитооптический эффект Фарадея [4], были исследованы доменная структура и петли гистерезиса монокристаллических пленок.

Для удобства наблюдения доменной структуры пленки «пересаживались» с NaCl на стекло. Видимо, эта пересадка не вызывает больших изменений в структуре пленок, хотя пленка при этом деформируется и соприкасается с водой. Поверхность ее остается блестящей, а неровности, вызванные «ступеньками» на поверхности кристалла-подложки, расправляются. Петли гистерезиса после пересадки по существу не изменяются.

Из кристаллической структуры пленки, выращенной на свежем сколе кристалла NaCl при температурах, превышающих 250°C , следует наличие двух равноценных осей легкого намагничивания, расположенных под прямым углом друг к другу (направления $[100]$ и $[010]$). Петли пленок с одной преимущественной ориентацией (рис. 1, а) мало отличаются от петель пленок, имеющих две кристаллографические ориентации (рис. 1, б), если одна из ориентаций выражена относительно слабо.

На рис. 2 приведены петли гистерезиса, полученные при перемагничивании под различными углами α между направлением перемагничивающего поля и направлением $[100]$, являющимся осью легкого намагничивания пленки. При $\alpha = 0$ наблюдается широкая прямоугольная продольная петля; поперечная петля отсутствует. При увеличении α появляется поперечная петля, а на ветвях продольной петли наблюдается перегиб. По мере приближения к трудному направлению $[110]$ ($\alpha = 45^{\circ}$) высота продольной петли уменьшается, поперечная петля сильно расширяется и пики на ней сглаживаются. При перемагничивании в направлении $[110]$ продольная петля несколько ниже и уже продольной петли в легком направлении; поперечная петля при этом отсутствует.

Наблюдения доменной структуры показывают, что при размагничивании пленки переменным полем убывающей амплитуды вдоль одного из легких направлений она разбивается на ряд плоскопараллельных доменов.

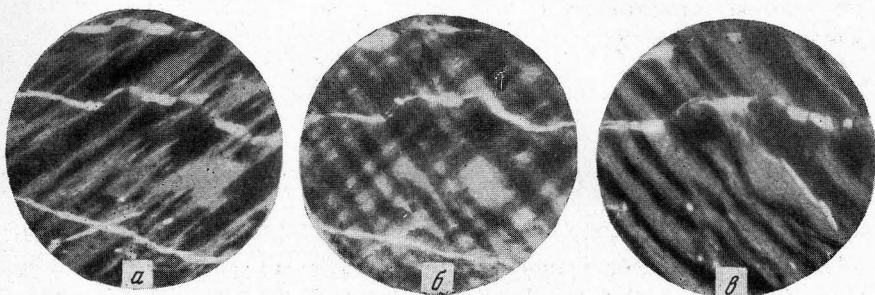


Рис. 3. Доменная структура монокристаллической пленки, размагниченной в трудном направлении

a — при наблюдении вдоль оси трудного намагничивания, *б* — при наблюдении вдоль оси легкого намагничивания, *в* — при наблюдении вдоль второй оси трудного намагничивания. Ось легкого намагничивания горизонтальна

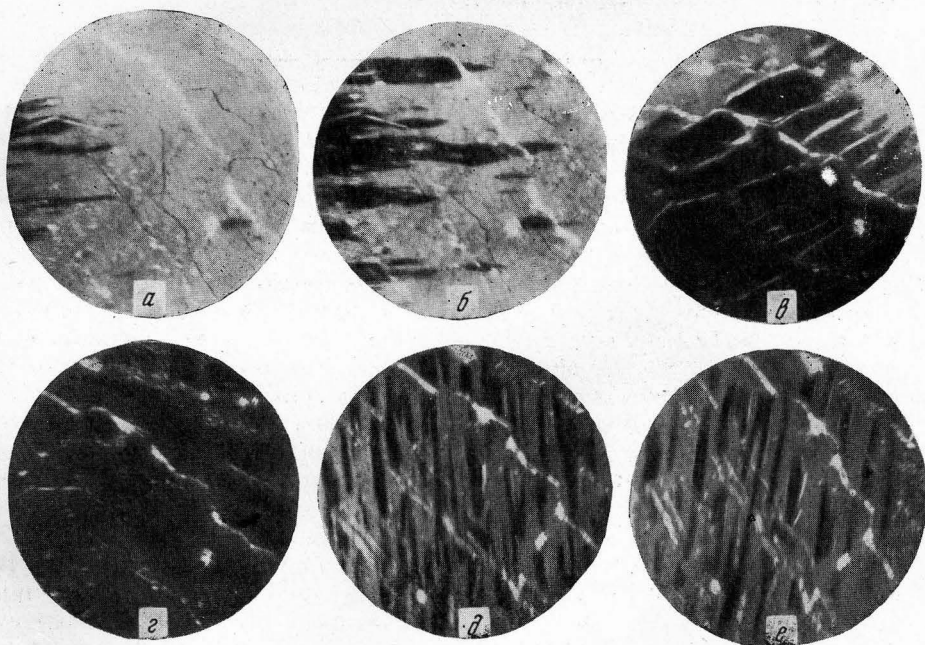


Рис. 4. Изменения доменной структуры при перемагничивании пленки в трудном направлении, наблюдаемые вдоль оси трудного намагничивания, параллельной внешнему полю

a — $H = 12,5$ э, *б* — 14 э, *в* — 17 э, *г* — 20 э, *д* — 20 э, *е* — 40 э. Перемагничивающее поле горизонтально

вытянутых вдоль этой оси. Перемагничивание в этом направлении осуществляется смещением 180-градусных границ.

Более сложная картина (так называемая структура «шахматной доски») [5] наблюдается при размагничивании в трудном направлении [110]. Пленка в этом случае разбивается на множество мелких доменов с 90-градусными границами. На рис. 3 показано, как выглядят эти домены при различных положениях пленки относительно плоскости падения света*.

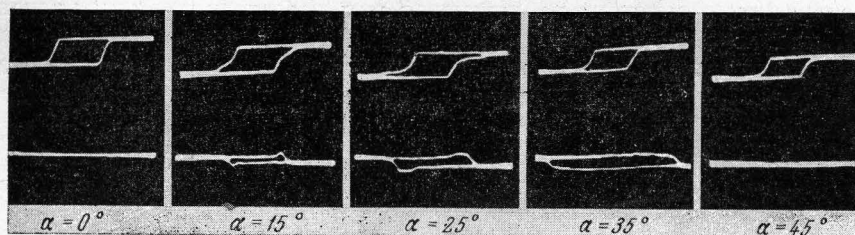


Рис. 2. Петли гистерезиса монокристаллической железной пленки толщиной 600 Å с коэрцитивной силой 16 э

Верхние петли — продольные, нижние — поперечные

Если пленка расположена так, что одно из направлений [110] лежит в плоскости падения света, то наблюдается система плоско-параллельных доменов, вытянутых вдоль оси трудного намагничивания (рис. 3, а). Если вторая ось трудного намагничивания лежит в плоскости падения света, то наблюдается вторая система плоско-параллельных доменов, вытянутых (вдоль второй такой оси рис. 3, в). Если же в плоскости падения света расположена ось легкого намагничивания ([100] или [010]), то видны черные, серые и белые четырехугольники, напоминающие поля шахматной доски (рис. 3, б).

При перемагничивании пленки вдоль одного из трудных направлений наблюдения доменной структуры проводились в обоих трудных направлениях. Было замечено, что при наблюдении в направлении, параллельном перемагничивающему полю, происходит процесс смещения границ (рис. 4, а — г), а вдоль второго трудного направления такого процесса не наблюдается. При многократном перемагничивании все время видна одна и та же структура, полученная при размагничивании (рис. 4, д, е). С увеличением поля контраст этой картины уменьшается, но после выключения поля восстанавливается полностью.

При перемагничивании пленки под некоторым углом к направлению [100] наблюдаются следующие процессы. Если угол α невелик ($10-15^\circ$), то при определенной величине внешнего поля возникают зародыши перемагничивания, границы которых вытянуты вдоль направления [110], а вектор намагниченности в них направлен по [010]. Когда смещение их границ закончено, опять возникают зародыши с вектором намагниченности, направленным по оси [100]. После завершения процесса смещения границ вектор намагниченности устанавливается вдоль оси легкого намагничивания, ближайшей к внешнему полю. Дальнейшее увеличение поля вызывает поворот вектора намагниченности пленки к направлению поля, что приводит к потемнению или просветлению поля зрения.

* При наблюдении доменов при помощи эффекта Фарадея картина доменной структуры зависит от того, как ориентирован образец относительно плоскости падения света, поскольку угол поворота плоскости поляризации света, прошедшего через образец, пропорционален проекции вектора намагниченности на направление распространения света.

Если угол α составляет $20-30^\circ$, то после окончания процесса смещения границ первой системы доменов наблюдается как бы «замораживание» вектора намагниченности. Это замораживание проявляется на продольной петле в виде ступенек. Если α близко к 45° , то образования второй системы зародышей не наблюдается.

3. Влияние поперечного поля на перемагничивание пленок

Интересные изменения наблюдаются при перемагничивании пленок в легком направлении с одновременным наложением постоянного поперечного поля (рис. 5). По мере возрастания поперечного поля H_\perp на обеих ветвях продольной петли появляются ступеньки, а на поперечной петле —

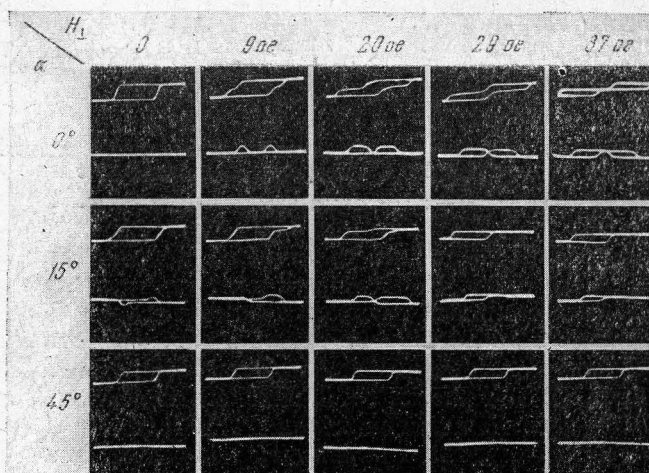


Рис. 5. Влияние постоянного поперечного поля на перемагничивание монокристаллической пленки Fe

два направленных в одну сторону пика. При достаточно большом H_\perp петли вообще разделяются на две.

Наложение таких же по величине поперечных полей при перемагничивании в трудном направлении вызывает некоторое уменьшение высоты продольной петли и более плавный ход ее ветвей, а также появление слабого прогиба на поперечной петле. Наложение поперечного поля при перемагничивании во всех других направлениях вызывает асимметрию петель гистерезиса. При больших поперечных полях остаются только половинки петель.

Наложение небольшого поперечного поля при перемагничивании вдоль легкого направления делает выгодным образование в пленке 90° -градусных зародышей перемагничивания. После завершения смещения границ этих зародышей вектор намагниченности оказывается направленным вдоль поперечного поля, при этом чем больше поперечное поле, тем дольше оно удерживает вектор намагниченности в этом положении. На продольной петле получается перехват в виде горизонтального участка с нулевым сигналом. Однако увеличение перемагничивающего поля вызывает появление 90° -градусных зародышей и смещение их границ. Таким образом, появляется вторая половинка петли. Если H_\perp достаточно велико, то процессы смещения уступают место процессам вращения. При этом вектор намагниченности поворачивается сначала на 90° и устанавливается по попе-

речному полю, а затем поворачивается еще на 90° . Таким образом, наложение постоянного поперечного поля при перемагничивании в легком направлении создает в пленке три положения устойчивого равновесия.

Наложение поперечного поля при перемагничивании в трудном направлении делает невыгодным образование 90° -градусных зародышей перемагничивания. В этом случае более выгодно становится вращение вектора намагниченности от одного легкого направления к другому. По мере увеличения H_\perp поворот происходит на меньший угол, чему соответствует уменьшение высоты продольной петли. Аналогично можно объяснить изменение петель гистерезиса и при других углах α .

Заключение

Исследование показало, что наличие двух осей легкого намагничивания приводит к ряду особенностей в процессах перемагничивания пленок по сравнению с обычными одноосными пленками — образование 90° -градусных границ, особое поведение при наложении поперечного поля. Полученные одновременно с монокристаллическими поликристаллические пленки на стекле и на загрязненном сколе NaCl такими свойствами не обладают.

Литература

1. Э. Г. Пинскер, С. В. Каверин. Тр. Ин-та кристаллогр. АН СССР, 12, 3, 1956.
2. S. Chikazumi. J. Appl. Phys., 32, 81, 1961.
3. H. Voersch, V. Raith. Z. Phys., 161, 1, 1961.
4. C. A. Fowler, E. M. Fryer. J. Appl. Phys., 24, 104, 1956; Л. В. Киренский, И. П. Антипин, И. Ф. Дегтярев, С. В. Кан, М. К. Савченко, Ю. Д. Тропин, В. А. Буравихин, И. С. Эдельман. Тезисы докладов на симпозиуме по ферромагнетизму и сегнетоэлектричеству. Ленинград, 30 мая — 5 июня 1963 г.
5. H. Sato, R. W. Astruc. J. Appl. Phys., 33, 2956, 1962; Y. Condo. J. Phys. Soc. Japan, 17, 1129, 1962.

Институт физики
СО АН СССР

Поступила в редакцию
18.XII.1963