

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ТОНКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ

Л. В. Киренский и И. С. Эдельман

Для исследования ряда свойств тонких ферромагнитных пленок может быть использован магнитооптический эффект Фарадея — поворот плоскости поляризации света при прохождении его через намагниченный ферромагнетик. Фаулер и Фрайер [1] и Раймер [2] наблюдали с помощью этого эффекта доменную структуру прозрачных пермалловых пленок. Позже эффект Фарадея был применен для наблюдения доменной структуры тонких пленок и изучения процессов, происходящих в них при квазистатическом перемагничивании [3—5].

В настоящей работе с помощью эффекта Фарадея изучались процессы, происходящие в тонких железных пленках при перемагничивании их под различными углами к легкой оси с одновременным наложением постоянного магнитного поля, перпендикулярного перемагничивающему.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Применялась экспериментальная установка, аналогичная [1]. При прохождении плоскополяризованного света через ферромагнитную пленку плоскость поляризации поворачивается на угол, пропорциональный намагниченности пленки и ее толщине. Поворот плоскости поляризации вызывается только проекцией вектора намагниченности на направление распространения света, поэтому пленка располагается под углом 45° к оптической оси системы, состоящей из источника света, поляризатора, образца, анализатора и микроскопа.

Если пленка разбита на ряд участков с различными направлениями намагниченности, то эти участки поворачивают плоскость поляризации проходящего через них света на разные углы. Поворотом анализатора гасится свет, проходящий через участки с одинаковым направлением намагниченности, благодаря чему в поле зрения микроскопа возникает изображение доменной структуры в виде темных и светлых пятен. Фотографирование доменной структуры осуществлялось с помощью микрофотонасадки МФН-2.

Взаимно перпендикулярные магнитные поля создавались двумя парами колец Гельмгольца. Лабораторное магнитное поле компенсировалось.

На этой же установке производилось осциллографирование петли гистерезиса методом, аналогичным примененному в [6] для установки, использующей магнитооптический эффект Керра. Микрофотонасадка заменялась фотоумножителем ФЭУ-19, который регистрировал изменение интенсивности проходящего через пленку света, возникающее при перемагничивании пленки. Если пленка перемагничивается синусоидальным переменным током частоты ω , на выходе фотоумножителя возникают импульсы напряжения; форма их соответствует форме ветвей петли гистерезиса, а длительность равна π/ω . Никаких сведений ни об амплитуде перемагничивающего поля, ни о ширине петли гистерезиса эти импульсы не дают. Изображение петли получается при взаимодействии импульсов с синусоидой переменного напряжения, подаваемого на усилитель горизонтальной развертки осциллографа с сопротивлением, включенного последовательно с перемагничивающими катушками (импульсы с фотоумножителя поступают на усилитель вертикальной развертки).

Такое осциллографирование петли гистерезиса является типичным примером фазовых измерений. Истинное изображение петли может быть получено только при полном совпадении фаз синусоидальной развертки и импульсов. Сдвиг фаз между разверткой и импульсами вызывает искажение петли. Нетрудно показать, что изме-

ряемая при этом на экране осциллографа коэрцитивная сила H_c' связана с истинной коэрцитивной силой H_c пленки следующим соотношением:

$$H_c' = H_c [\cos \varphi + \sin \varphi \sqrt{\left(\frac{H_0}{H_c}\right)^2 - 1}], \quad (1)$$

где φ — сдвиг фаз между синусоидальной разверткой и импульсами, H_0 — амплитуда перемагничивающего поля.

Из этого соотношения видно, что при $\varphi > 0$ H_c' растет с увеличением H_0 . Следовательно, для правильного измерения коэрцитивной силы нужно ввести в установку цепь фазовой коррекции или внести в результаты измерений поправку в соответствии с формулой (1).

Петля гистерезиса отражает изменение проекции вектора намагниченности на направление распространения света. Если перемагничивающее поле приложено в плоскости падения света, петля соответствует изменению намагниченности в направлении поля и называется продольной. Если же перемагничивающее поле приложено нормально к плоскости падения света, то петля соответствует изменению намагниченности в направлении, перпендикулярном полю, и называется поперечной. Из вышесказанного ясно, что поперечная петля появляется только тогда, когда при перемагничивании имеет место процесс вращения вектора намагниченности. В случае чистых смещений вдоль перемагничивающего поля поперечная петля отсутствует. Она не наблюдается и в случае, когда в отдельных участках пленки происходят повороты вектора намагниченности на равные по величине, но противоположные по знаку углы, так что общее изменение интенсивности прошедшего через пленку света равно нулю [7].

Следует отметить, что в случае, когда перемагничивание осуществляется путем смещения границ доменов, но ось, вдоль которой лежит вектор намагниченности, направлена под некоторым постоянным углом к перемагничивающему полю, будет наблюдаться поперечная петля; в этом случае форма продольной и поперечной петель будет одинаковой и различаться они будут только высотой. Таким образом, по виду поперечной петли можно судить о наличии и роли процессов вращения при перемагничивании пленки в том или ином направлении. При изучении процессов перемагничивания в железных пленках проводились следующие наблюдения.

1. В каждой пленке определялось направление, в котором коэрцитивная сила пленки H_c максимальна. Как известно, это направление является осью легчайшего намагничивания.

2. На частоте 50 гц фотографировались продольные и поперечные петли гистерезиса при различных углах α между легчайшей осью и направлением перемагничивающего поля. Угол α изменялся от 0 до 90° с интервалом 10°.

3. При тех же значениях α наблюдалась и фотографировалась доменная структура в процессе перемагничивания пленки в медленно меняющемся поле.

4. В направлении, перпендикулярном перемагничивающему полю, налагалось плавно изменяющееся постоянное поле H_{\perp} . Наблюдалась петля гистерезиса вплоть до тех значений H_{\perp} , начиная с которых петли закрывались.

5. При некоторых значениях H_{\perp} наблюдалась доменная структура, возникающая при перемагничивании медленно меняющимся полем (величина α при этом варьировалась).

6. По характеру изменения доменной структуры и петель гистерезиса определялись процессы, протекающие в пленке при ее перемагничивании в том или ином направлении в различных поперечных полях. Для каждого значения α измерялись предельные поперечные поля, при которых имеют место чистые процессы смещения или вращения. По этим данным строились диаграммы $H_{\perp} - \alpha$, показывающие, какие процессы протекают в пленке при перемагничивании ее под любым углом к легчайшему направлению и при наложении поперечного поля различной величины.

Исследованию подвергались железные пленки, напыленные в вакууме 10⁻⁵ мм рт. ст. из вольфрамовых тиглей на стеклянные подложки, нагретые до 300°. Пленки имели форму дисков диаметром 8 мм и толщиной от 300 до 1000 Å. Коэрцитивная сила исследованных пленок колебалась от 5 до 25 э.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 1 приведены петли гистерезиса (продольные и поперечные) для одной из пленок толщиной 700 Å с $H_c = 9,6$ э при $\alpha = 0$. Для других пленок характер зависимости петель от угла α и от перпендикулярного поля H_{\perp} качественно такой же; следовательно, приведенные на рис. 1 петли типичны для всех исследованных нами железных пленок.

Петли гистерезиса при $H_{\perp} = 0$. Первый вертикальный столбец на рис. 1 соответствует $H_{\perp} = 0$. При $\alpha = 0$ пленка имеет широкую более или менее прямоугольную продольную петлю гистерезиса, поперечная

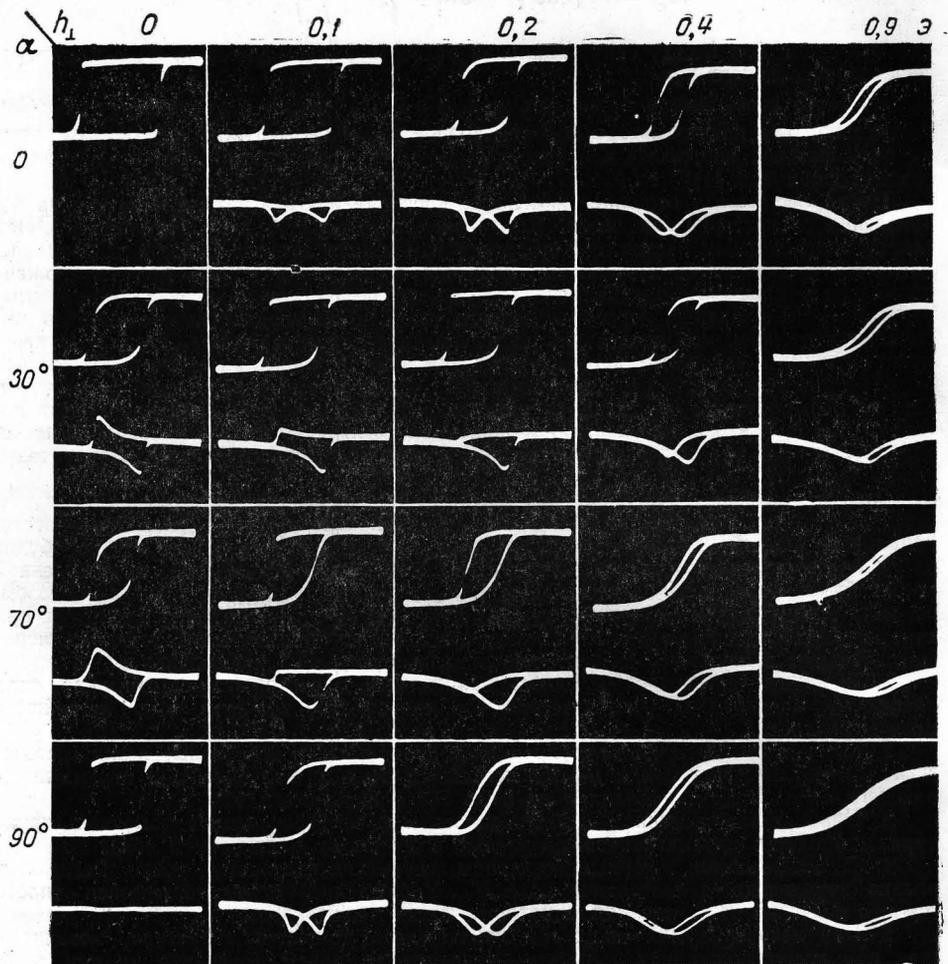


Рис. 1. Петли гистерезиса железной пленки толщиной 700 Å с $H_c = 9,6$ э. Верхние петли сняты в продольном поле, нижние — в поперечном. $h_{\perp} = H_{\perp}/H_c$.

петля отсутствует. По мере увеличения α (примерно до 60°) продольная петля становится уже, ее ветви закругляются и появляется поперечная петля. Значения H_c при различных значениях α приведены ниже.

α , град	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
H_c , э	9,6	9,2	8	6,8	5,6	4	4	4,8	5,5	7,2

Наиболее узкая продольная и наиболее раскрытая поперечная петля наблюдаются при $\alpha = 50-60^\circ$. С дальнейшим увеличением угла продольная петля опять расширяется, а поперечная постепенно закрывается. При $\alpha = 90^\circ$ наблюдается прямоугольная продольная петля, несколько более узкая, чем при $\alpha = 0$. Отсутствие поперечной петли при $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ и характер ее изменения для других значений α дают основания предполагать, что при перемагничивании пленки под указанными углами отсутствует вращение вектора намагниченности.

Доменная структура при $H_{\perp} = 0$. На рис. 2 приведены фотографии доменной структуры, полученные во время перемагничивания этой же пленки под различными углами к легчайшей оси для некоторых фиксированных значений нарастающего перемагничивающего поля.

При перемагничивании вдоль направления $\alpha = 0$ и под малыми углами к нему в некотором поле образуется зародыш обратной намагни-

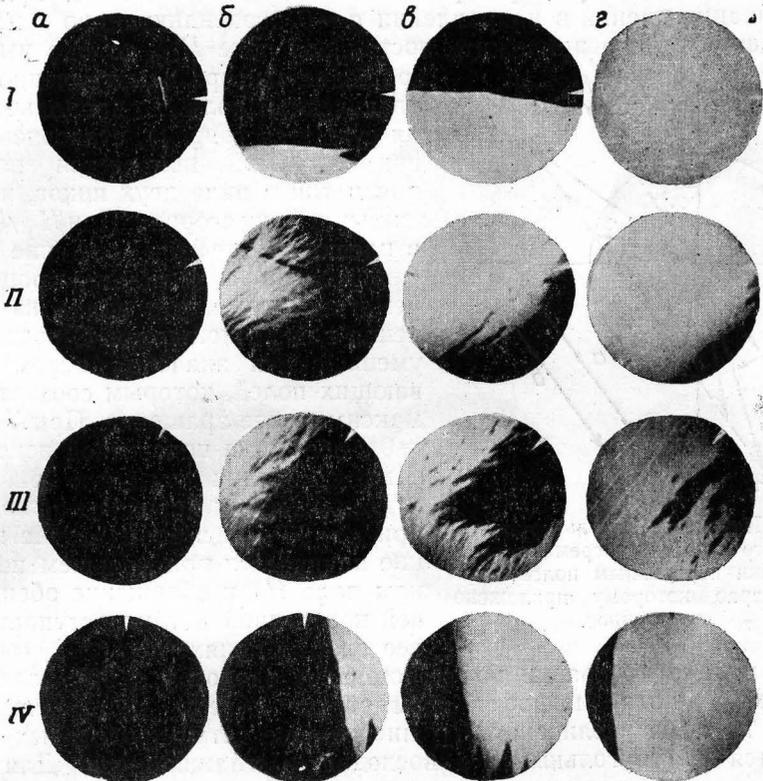


Рис. 2. Изменения доменной структуры при перемагничивании железной пленки с $H_c = 9,6$ э при различных значениях H и α :

I. $\alpha = 0$: а — $H = 0$; б — 9 э; в — 9,75 э; г — 11 э; II. $\alpha = 30^\circ$: а — $H = 0$; б — 6 э; в — 7,7 э; г — 10,3 э; III. $\alpha = 70^\circ$: а — $H = 0$; б — 3,4 э; в — 4 э; г — 5 э; IV. $\alpha = 90^\circ$: а — $H = 0$; б — 6,7 э; в — 6,9 э; г — 7,7 э. Легкая ось направлена горизонтально, стрелкой показано направление перемагничивающего поля.

ченности и перемагничивание осуществляется смещением его границ в малом интервале полей.

При $\alpha = 20-30^\circ$ перемагничивание начинается с появления мало-контрастной мелкой структуры в виде ряби. При увеличении поля отдельные домены сливаются, образуя крупные домены, размеры которых изменяются путем смещения границ.

При $\alpha = 40-60^\circ$ наблюдается аналогичная картина; домены становятся еще более мелкими, мало-контрастными и многочисленными, рост и слияние их происходят более плавно. После того, как все домены слились, с увеличением поля происходит потемнение (или посветление) поля зрения, что соответствует повороту вектора намагниченности к направлению поля.

При $\alpha = 70^\circ$ также наблюдается мелкая мало-контрастная структура, но по мере увеличения поля образуются и растут также и крупные домены, контрастность которых несколько выше, чем при $\alpha = 60^\circ$.

При $\alpha = 80^\circ$ возникают несколько доменов, быстро сливающихся в один, граница которого перемещается с увеличением поля вплоть до насыщения.

При $\alpha = 90^\circ$, как и в случае $\alpha = 0$, образуется один зародыш обратной намагниченности и перемагничивание осуществляется смещением его границы.

Влияние H_\perp на характер перемагничивания пленки. Если при перемагничивании пленки в направлении $\alpha = 0$ перпендикулярно к перемагничивающему полю приложить постоянное поле H_\perp , то оно вызывает вращение вектора намагниченности. С увеличением поля H_\perp продольная петля сужается (рис. 1), становясь менее прямоугольной, появляется поперечная петля в виде двух пиков, направленных в одну сторону. При $H_\perp/H_c = 0,2$ в пленке с $H_c = 9,6$ э вращение вносит уже значительный вклад в процесс перемагничивания, что видно из увеличения поперечной петли. С ростом H_\perp уменьшаются значения перемагничивающих полей, которым соответствует максимальное вращение. При $H_\perp/H_c = 0,9$ обе ветви поперечной петли сливаются, образуя изогнутую кривую.

Аналогичная картина наблюдается при $\alpha = 90^\circ$, но в этом случае вращение начинается при меньшем поперечном поле H_\perp и сближение обеих ветвей поперечной петли наступает в более слабых полях H_\perp .

Рис. 3. Изменение результирующего магнитного поля при перемагничивании пленки переменным полем, перпендикулярно которому приложено постоянное.

При перемагничивании под углом α , не равном 0 и 90° , наложение поперечного поля вызывает асимметрию петель гистерезиса (см. рис. 1): по мере увеличения H_\perp нисходящие ветви продольных петель становятся прямоугольными, а восходящие сглаживаются. Для каждого угла α существует определенное поле H_\perp порядка 1—2 э, при котором нисходящая ветвь продольной петли наиболее прямоугольна, а нисходящая ветвь поперечной петли отсутствует. При дальнейшем увеличении H_\perp нисходящие ветви продольных петель также сглаживаются, а на поперечных петлях появляется второй пик. При $H_\perp/H_c \sim 1$ и продольные и поперечные петли закрываются.

При любых α более прямоугольны нисходящие ветви петель, восходящие — более гладки (рис. 1). Изменение знака поля H_\perp приводит к обратной картине: более прямоугольными в этом случае становятся восходящие ветви петель.

Рис. 3 показывает последовательные значения магнитных полей при перемагничивании пленки под углом α переменным полем H_\sim , нормально к которому наложено постоянное поле H_\perp . Видно, что пленка при этом перемагничивается в поле, меняющем и величину и направление. На рис. 1 восходящая ветвь петли соответствует перемагничиванию из направления H_1 в направление H_2 (случай а), а нисходящая обратному процессу (случай б). Из рис. 3 ясно, что условия перемагничивания не эквивалентны: легчайшая ось по отношению к полям H_1 и H_2 расположена не одинаково.

Неодинаковое поведение намагниченности в случаях а и б хорошо наблюдается на доменной структуре. На рис. 4 показано изменение

доменной структуры пленки с $H_c = 9,6$ э при $\alpha = 30^\circ$ и $H_\perp = 1,1$ э. При намагничивании в направлении a с увеличением поля возникает малококонтрастная структура, затем образуются очень мелкие домены, процесс намагничивания идет плавно; при перемагничивании в направлении b образуется всего один домен обратной намагниченности и с увеличением поля происходит смещение его границ.

Аналогичная картина возникает в определенном интервале полей H_\perp для всех α , не равных 0 или 90° .

Диаграммы $H_\perp - \alpha$. На основании наблюдений доменной структуры и петель гистерезиса строились диаграммы $H_\perp - \alpha$, отражающие ха-

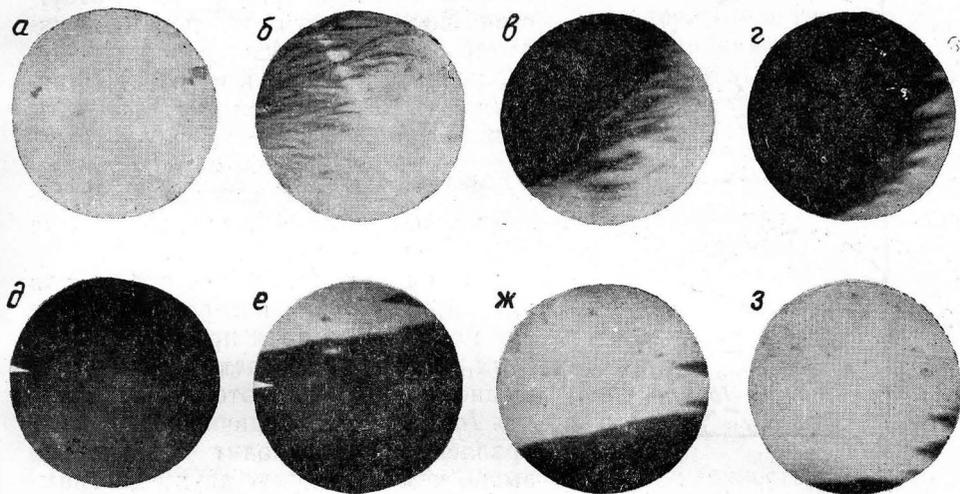


Рис. 4. Изменение доменной структуры при перемагничивании пленки с $H_c = 9,6$ э при $\alpha = 30^\circ$ и $H_\perp = 1,1$ э. Перемагничивающее поле горизонтально: а — $H = 0$; б — 4 э; в — 5,7 э; г — 7 э; д — 12 э; е — $H = -8,7$ э; ж — $H = -9$ э; з — $H = -13$ э.

рактир процесса перемагничивания пленки для любых значений α и H_\perp . Для трех пленок такие диаграммы приведены на рис. 5. Первая диаграмма на этом рисунке построена для пленки с $H_c = 9,6$ э, петли гистерезиса и доменная структура которой показаны на предыдущих рисунках.

В направлении a ниже кривой Ia лежит область углов и полей, при которых перемагничивание данной пленки происходит только путем смещения границ. Эта область чрезвычайно мала, она включает углы, близкие к 0 и 90° , и поля H_\perp , не превышающие 0,5 э. Между кривыми Ia и IIa лежит область углов и полей, при которых перемагничивание в направлении a вызвано и вращением вектора намагниченности и смещением границ; выше кривой IIa — только вращением. Видно, что при перемагничивании под углами $\alpha = 50-60^\circ$ нужны очень небольшие поперечные поля $H_\perp \sim 0,8$ э, чтобы перемагничивание в направлении a осуществлялось только вращением вектора намагниченности.

Совершенно иная картина наблюдается при перемагничивании в направлении b . Здесь при любом α можно получить чистые смещения, приложив соответствующее поперечное поле. Область смещений лежит между кривыми IIb и $IIIb$. Ниже кривой IIb и между кривыми $IIIb$ и IVb наблюдаются и вращения и смещения. Выше кривой IVb перемагничивание происходит только вращением вектора намагниченности.

При $\alpha = 30^\circ$ для получения чистого вращения нужно приложить наибольшее поперечное поле.

Вторая диаграмма на рис. 5 построена для пленки с $H_c = 11,3$ э. Эта пленка ведет себя несколько иначе. При $\alpha = 50-60^\circ$ в отсутствие поперечного поля она перемагничивается только вращением, поэтому кривая IIa для перемагничивания в направлении a в этой области углов имеет разрыв, а при перемагничивании в направлении b появляется

кривая Ib , ограничивающая сверху область углов и полей, при которых имеет место только вращение вектора намагниченности. При $\alpha = 90^\circ$ в отсутствие поперечного поля перемагничивание осуществляется и смещением границ и вращением вектора намагниченности, поэтому кривые $IIIb$ и IIb , между которыми заключена область чистых смещений, сходятся в точке $\alpha \approx 85^\circ$, $H_\perp \approx 1$ э. В остальном характер кривых остается таким же, как на первой диаграмме.

Третья диаграмма построена для пленки с $H_c = 8,3$ э, которая в отсутствие поперечного поля при всех значениях α перемагничивается только смещением границ. Для этой пленки кривая Ia при перемагничивании в направлении a проходит значительно выше, чем на первых двух диаграммах, а при перемагничивании в направлении b ниже кривой $IIIb$ лежит довольно большая область чистых смещений и все кривые идут более плавно по сравнению с предыдущими случаями.

Три представленные на рис. 5 диаграммы типичны для исследованных нами железных пленок.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перемагничивание пленок при $H_\perp = 0$.

Перемагничивание железных пленок вдоль направлений $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ осуществляется смещением границ доменов, намагниченность которых располагается вдоль направления $\alpha = 0$ в первом случае и вдоль направления $\alpha = 90^\circ$ — во втором. Процесс вращения в этих направлениях либо совершенно не наблюдается, либо играет пренебрежимо малую роль. При α , отличном от 0 и 90° , перемагничивание осуществляется и смещением доменных границ и вращением вектора намагниченности. Как правило, вначале возникает некоторое вращение, затем протекает процесс смещения, в течение которого процесс вращения продолжается, после чего снова имеет место только процесс вращения, которым и завершается перемагничивание. С увеличением угла α вклад вращения в процесс перемагничивания возрастает, достигает максимума при $\alpha = 50-60^\circ$, а затем снова уменьшается и при $\alpha = 90^\circ$ отсутствует.

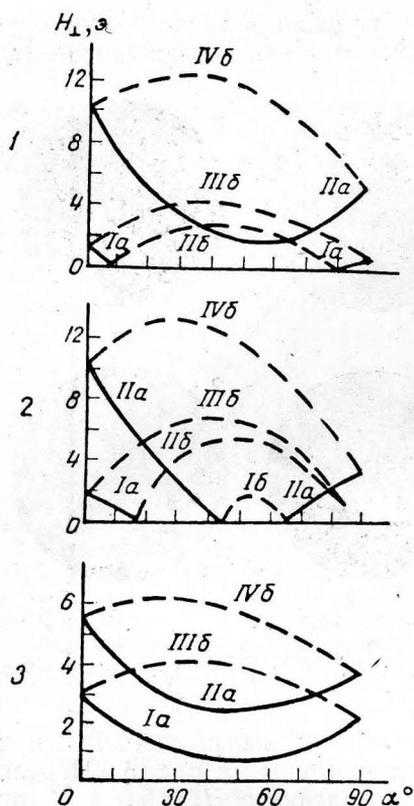


Рис. 5. Диаграммы $H_\perp - \alpha$ для трех железных пленок:

1 — $H_c = 9,6$ э; 2 — $11,3$ э; 3 — $8,3$ э. Сплошные линии — перемагничивание в направлении a , пунктирные — в направлении b

Влияние H_{\perp} на характер перемагничивания железных пленок. Наложение постоянного магнитного поля H_{\perp} нормально перемагничивающему полю при $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ приводит к появлению вращения вектора намагниченности. С ростом H_{\perp} вклад вращения возрастает и, начиная с некоторых значений H_{\perp} , перемагничивание осуществляется чистым вращением. При α , отличном от 0 и 90° , наложение H_{\perp} приводит к асимметрии петель гистерезиса: одна ветвь петли становится более прямоугольной, другая — более гладкой; на более прямоугольной ветви возрастает вклад смещений, а на более гладкой — вращений.

Очень удобным приемом изучения процессов, происходящих при перемагничивании пленок, является построение диаграмм $H_{\perp} - a$.

Анизотропия в железных пленках. Характер петель гистерезиса и поведение доменной структуры при перемагничивании пленок под любыми α позволяют предположить, что в исследованных нами железных пленках имеются две неэквивалентные оси легкого намагничивания: ярко выраженная легчайшая ось при $\alpha = 0$ и менее ярко выраженная — при $\alpha = 90^\circ$; две оси трудного намагничивания расположены соответственно при $\alpha = 50-60^\circ$ и $\alpha = 130-120^\circ$.

Известно, что одноосная и двухосная анизотропия в какой-либо плоскости описывается одним и тем же разложением энергии в ряд по степеням направляющих косинусов вектора намагниченности

$$E_{\text{ан}} = k_1' \cos^2 \alpha + k_2' \cos^4 \alpha + \dots \quad (2)$$

Можно также описать анизотропию разложением энергии в ряд Фурье

$$E_{\text{ан}} = -k_1 \cos 2\alpha - k_2 \cos 4\alpha - \dots \quad (3)$$

Это выражение совпадает с выражением (2) с точностью до членов, не зависящих от α ; при этом $k_1 = -(k_1' + k_2')/2$, $k_2 = -k_2'/8$. Использовать выражение (3) вместо (2) иногда удобнее, так как первый член здесь описывает вклад одноосной анизотропии (с легкой осью при $\alpha = 0$), второй — двухосной (с легкими осями при $\alpha = 0$ и 90°), а последующие — вклад поправок более высокой частоты.

При учете двух членов в разложении энергетическая диаграмма анизотропии может иметь два минимума: ярко выраженный минимум при $\alpha = 0$ и слабо выраженный (если $k_1 \neq 0$) минимум при $\alpha = 90^\circ$, — и два максимума: при $\alpha = \alpha_0$ и $\alpha = 180^\circ - \alpha_0$. Значение α_0 может быть любым и зависит от соотношения между k_1 и k_2 .

Таким образом, выражение (3) формально может описать ситуацию, имевшую место в наших пленках; соотношение между k_1 и k_2 при этом должно быть таким, чтобы угол α_0 составлял $50-60^\circ$.

Для выяснения природы такой двухосной анизотропии с неэквивалентными осями легкого намагничивания требуется проведение специальных исследований.

Интересно отметить, что подобную же энергетическую диаграмму дают в плоскости (110) два первых члена выражения для трехосной кубической анизотропии типа железа

$$E_{\text{ан}} = K_1 (\beta_1^2 \beta_2^2 + \beta_1^2 \beta_3^2 + \beta_2^2 \beta_3^2) + K_2 \beta_1^2 \beta_2^2 \beta_3^2. \quad (4)$$

Действительно, если вектор намагниченности лежит в плоскости (110), это выражение принимает вид

$$E_{\text{ан}} = K_1 \sin^2 \alpha \left(\cos^2 \alpha + \frac{1}{4} \right) + \frac{1}{4} K_2 \cos^2 \alpha \sin^4 \alpha. \quad (5)$$

Это выражение имеет глубокий минимум при $\alpha = 0$, меньший при

$\alpha = 90^\circ$ и максимумы при $\alpha \approx 55^\circ$ и $\alpha \approx 125^\circ$. Рентгенографическими исследованиями установлено [8, 9], что в поликристаллических тонких пленках кристаллиты ориентированы не совершенно беспорядочно: в плоскости пленки имеется предпочтительная ориентация плоскостей (110) кристаллитов. Если при этом имеется частичное упорядочение направлений [100], лежащих в плоскости пленки, то анизотропия всей пленки будет описываться выражением (5), причем константы, входящие в это выражение, будут намного меньше констант анизотропии железа.

Магнитокристаллографическая симметрия пермаллоя такая же, как и железа; тот факт, что некоторые пермалловые пленки имеют наиболее узкую петлю гистерезиса в направлении $\alpha = 50-60^\circ$ (см., напр., [10]), возможно, также объясняется указанной выше причиной.

В заключение авторы выражают благодарность В. А. Игнатченко за полезную дискуссию по рассмотренным вопросам.

Институт физики
СО АН СССР

Поступила в редакцию
3 декабря 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fowler C. A., Fryer E. M. J. Appl. Phys., 1956, 24, 104.
2. Reimer L. Zs. Phys., 1957, 148, 527.
3. Houde A. L. J. Appl. Phys., 1961, 32, 1234.
4. Metzdorf W. Zs. angew. Phys., 1962, 14, 412.
5. Boersch H., Lambek M. Zs. Phys., 1960, 159, 248; 1961, 165, 176.
6. Пак Н. Г. и Кан С. В. ПТЭ, 1963, № 1, 133.
7. Middelhoek S. Helv. Phys. Acta, 1960, 33, 519.
8. Werderber R. R. J. Appl. Phys., 1959, 30, 1359. (Перевод в сб. «Тонкие магнитные пленки», Киев, 1963).
9. Adamsky R. F. J. Appl. Phys., 1960, 31, 289. (Перевод в сб. «Тонкие магнитные пленки», Киев, 1963).
10. Кобелев В. В. Петли гистерезиса одноосных ферромагнитных пленок. ИТМ и ВТ, М., 1961.