

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПЛЕНОК С ФЕРРО-АНТИФЕРРОМАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Я. М. ПОГОСЯН, Э. М. ГЭРЯН

Работа посвящена электронномикроскопическому исследованию некоторых аномалий в пленках с ферро-антиферромагнитным взаимодействием по сравнению с обычными пермаллоевыми пленками. Показано, что несмотря на то, что длина волны ряби намагниченности λ в этих пленках удовлетворяет уравнению Гоффмана, однако в этом случае из-за наличия однонаправленной анизотропии кривые зависимости λ от внешнего поля при перемагничивании в обеих полярностях ОЛН смещены друг относительно друга на величину $2\Delta H$. Кроме того, показано, что в этих пленках имеется одностороннее смещение границ, и приводится возможное объяснение этому явлению.

Несмотря на то, что процессу перемагничивания пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием посвящено довольно большое число работ [1—6], однако на уровне электронной микроскопии проведено очень мало исследований. Авторам настоящей работы известны лишь три работы [7—9]. В работе [7] рассмотрен характер перемагничивания по оси легкого намагничивания (ОЛН) и поворот вектора намагниченности на 90° к ОЛН под действием внешнего поля, в [8] рассмотрена стабилизация доменных границ при термомагнитном отжиге и в [9] делается попытка объяснить наблюдаемое сужение петли гистерезиса при перемагничивании пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием по ОЛН при увеличении частоты перемагничивания.

Детальное исследование пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием с привлечением метода лорентцевой микроскопии позволит получить более полные сведения об этом классе пленок, что, безусловно, будет способствовать разработке единой теории возникновения ферро-антиферромагнитного взаимодействия в пленках. Отметим, что этот класс пленок является наиболее перспективным для термомагнитной записи изображения с большой плотностью.

Настоящая работа посвящена электронномикроскопическому исследованию некоторых аномальных по сравнению с обычными пермаллоевыми пленками свойств пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием. Исследуемые пленки были получены методом вакуумного испарения на покровных стеклах микроскопа, предварительно напыленных подслоем каменной соли (толщина ~ 50 Å, температура подложки $\sim 100^\circ\text{C}$), монооксида кремния (толщина—100 Å, температура подложки $\sim 150^\circ\text{C}$), марганца (толщина—400 Å, температура подложки ~ 200 — 250°C) и затем пермаллоя состава 82/18 Ni/Fe при этой же температуре. Термомагнитный отжиг проводился при температуре 300 — 350°C как в вакуумной установке, так и непосредственно в электронном микроскопе. Нами были исследованы

в основном пленки со сдвигом петли гистерезиса ΔH до $0,6 \pm 0,7 H_c$. Исследования проводились на электронном микроскопе типа УЭМВ-100 К, снабженном гониометрической головкой и системой катушек Гельмгольца, обеспечивающей поле до 50 э в плоскости исследуемой пленки.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

I аномалия. При перемагничивании пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием по ОЛН при частоте 1000 гц приложением и снятием постоянно смещающего поля под углом 90° к ОЛН возвращение суммарной намагниченности к ОЛН осуществляется в течение нескольких секунд, что очень хорошо наблюдается по поперечной петле гистерезиса, приведенной на рис. 1. Рис. 1а соответствует петле гистерезиса пленки с ферро-

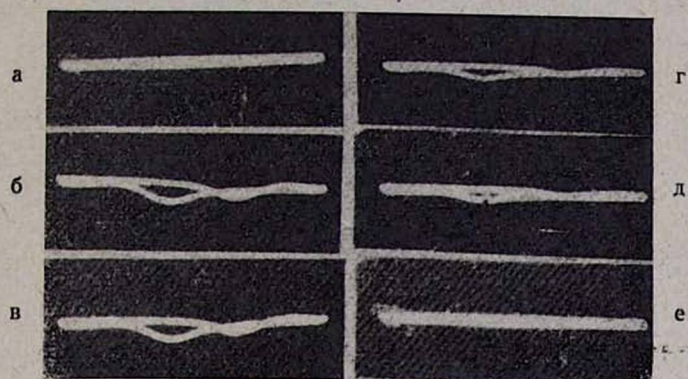


Рис. 1. Иллюстрация эффекта последействия в пленке с ферро-антиферромагнитным взаимодействием, обнаруженного на поперечной петле гистерезиса: а — поперечная петля гистерезиса при перемагничивании исследуемой пленки по ОЛН; б — то же при подаче постоянного поля, равного 10 э, под углом 90° к ОЛН; в, г, д, е — изменение формы петли соответственно через 1, 2, 3, 4 сек.

антиферромагнитным взаимодействием по ОЛН, б — то же при постоянном смещающем поле, действующем под углом 90° к ОЛН, в — петля гистерезиса через одну секунду после снятия постоянного смещающего поля, г, д, е — соответственно через 2, 3 и 4 секунды. Хорошо видно, что нормальный процесс перемагничивания (т. е. перемагничивание до приложения исходного постоянного смещающего поля) восстанавливается через несколько секунд после снятия постоянного поля. Магнитооптические исследования показали, что в отличие от перемагничивания по ОЛН после приложения постоянно действующего поля под углом 90° к ОЛН перемагничивание на первых нескольких циклах осуществляется не смещением доменных границ, хотя контраст изображения меняется. Последнее вместе с рис. 1 указывают, что после снятия постоянного смещающего поля вектор намагниченности не возвращается к ОЛН и дальнейший процесс перемагничивания осуществляется вращением вектора намагниченности.

Электронномикроскопические исследования показали, что в действительности после снятия насыщающего поля, приложенного под углом 90° к ОЛН, вектор намагниченности застывает в направлении приложенного поля (рис. 2), причем в отличие от нормальных пермалловых пленок по-

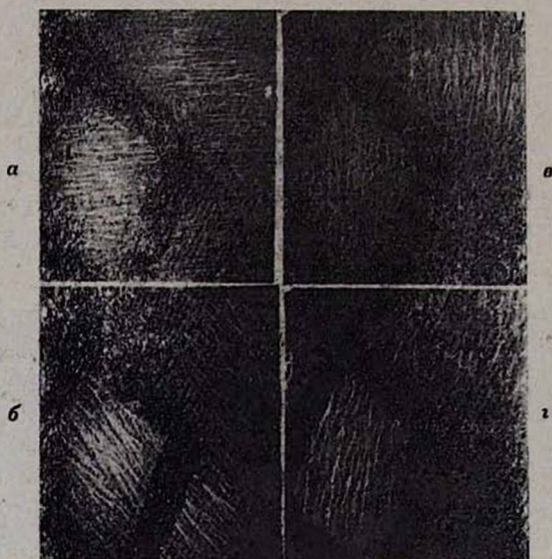


Рис. 2. Поведение ряби намагниченности под действием поля, приложенного под углом 90° к ОЛН: а — исходное состояние, б, в — процесс поворота, г — после снятия поля.

ворот вектора намагниченности в направлении действующего внешнего поля сопровождается ростом длины волны ряби намагниченности λ [10], а состояние остаточной намагниченности (рис. 2а) характеризуется максимальной длиной волны ряби намагниченности. Вектор намагниченности может оказаться застывшим и у обычных инверсных пермалловых пленок в направлении оси трудного намагничивания (ОТН) [11, 12], но там это явление приписывается распаданию пленки на домены с минимальным размером ≈ 2 мк и действию полей рассеяния образовавшихся границ Нееля.

В нашем случае, судя по рис. 2а, б, в, ферро-антиферромагнитное взаимодействие оказывает тормозящее действие повороту вектора намагниченности, что указывает на неблагоприятность поворота вектора намагниченности в плоскости пленки, а состояние остаточной намагниченности вряд ли обусловлено границами Нееля, так как рис. 2г не соответствует состоянию блокирования и здесь не выявлено четких границ Нееля.

Дальнейшее приложение поля в одном из направлений ОЛН приводит к переходу вектора намагниченности к ОЛН не возникновением 90° -ной границы, как в случае инверсных пленок [11, 12], а частичным вращением вектора намагниченности и возникновением доменной структуры (рис. 3), напоминающей лабиринтные домены [13], наблюдаемые в обычных пленках при перемагничивании под углом к ОТН. При этом поле, при котором осу-

ществляется возникновение лабиринтных доменов, сильно зависит от возникшего смещающего поля ΔH и от толщины исследуемой пленки. При толщине пленки $t=500 \text{ \AA}$ и $\Delta H=0,2 H_c$ величина этого поля может со-

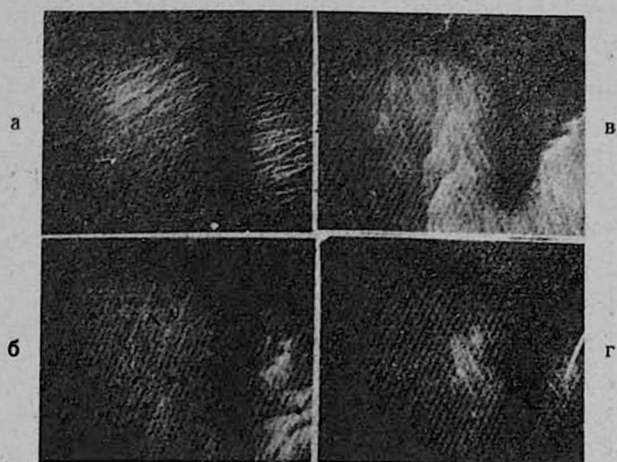


Рис. 3. Процесс перемагничивания пленки по ОЛН при предварительном приложении поля под углом 90° к ОЛН; а, б — начальное и конечное состояния.

ставить $\approx H_c$, что проявляется на поперечной петле, указывающей на наличие вращательных процессов при таком способе перемагничивания пленок.

При увеличении длительности термомангнитного отжига или, то же самое, ΔH также наблюдается возникновение лабиринтных доменов, но при сравнительно меньших полях.

Кроме того, нами наблюдалось также наличие гистерезиса при повороте вектора намагниченности на угол $\varphi \neq 90^\circ$ к ОЛН. В этом случае в зависимости от направления и величины ΔH вектор намагниченности приходит в свое равновесное состояние, не совпадающее с ОЛН.

Факт торможения при повороте вектора намагниченности от ОЛН и к ОЛН в плоскости пленки указывает на справедливость предположений работы [9] об изотропности образовавшегося подслоя ферро-антиферромагнитного взаимодействия и высокой его коэрцитивности. В этом свете приводимая в этой работе модель механизма сужения петли гистерезиса при увеличении частоты перемагничивающего поля, основанная на возможном повороте вектора намагниченности ферро-антиферромагнитного подслоя от ОЛН, по-видимому, справедлива. Тормозящее действие ферро-антиферромагнитного подслоя, выражающееся в росте длины волны ряби намагниченности, указывает на высокую коэрцитивность этого подслоя, не успевающего за поворотом вектора намагниченности ферромагнитной пленки.

II аномалия. Как было отмечено в [7], при перемагничивании пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием по ОЛН после возникновения границы наблюдается так называемое последствие, т. е. граница при

этом значении поля (даже если немного уменьшить его) может смещаться дальше вплоть до полного перемагничивания пленки.

С ростом ΔH выявляется различие в характере перемагничивания пленок по ОЛН в обеих полярностях. На рис. 4 приведены характерные снимки процесса перемагничивания пленки с $\Delta H = 0,6 H_c$, а соответствует процессу перемагничивания в полярности $\uparrow\uparrow \Delta \vec{H}$, а б—в направлении $\uparrow\downarrow \Delta \vec{H}$.

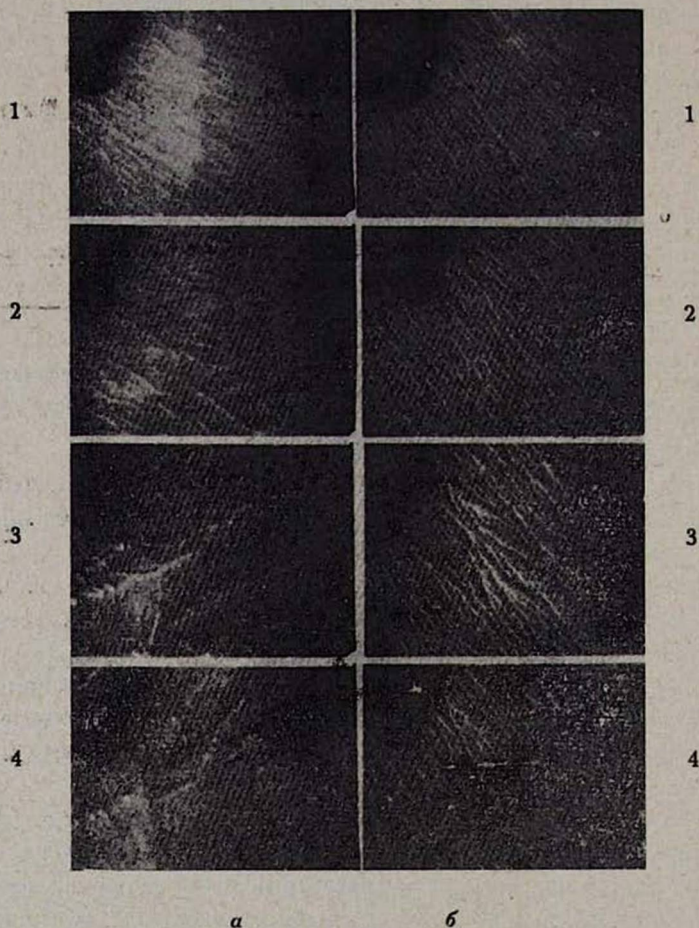


Рис. 4. Процесс перемагничивания пленки с $\Delta H = 0,6 H_c$ в направлении $\Delta \vec{H}$ (а) и в направлении, противоположном $\Delta \vec{H}$ (б).

Если в антипараллельном случае процесс перемагничивания осуществляется возникновением и смещением 180° -ной границы, в обратной полярности процесс обусловлен возникновением лабиринтных доменов, наблюдаемых также в [9]. Однако в обоих случаях этот процесс сопровождается изменением длины волны ряби намагниченности.

Детальное исследование этих пленок показало, что экспериментальная зависимость изменения длины волны ряби намагниченности от внешнего поля при перемагничивании пленки в обеих полярностях ОЛН пред-

ставляет собой параллельные кривые, смещенные друг относительно друга на величину $2\Delta H$.

Анализ этой зависимости показал, что при соответствующем подборе H_k^1 и H_k^2 (поле анизотропии в обеих полярностях) при условии $H_k^1 - H_k^2 = 2\Delta H = 28$ э (последнее найдено из эксперимента) эти кривые хорошо аппроксимируются уравнением Гоффмана [14]

$$\lambda_i^{1,2} = \lambda_0^{1,2} \left(\frac{1}{1 \pm \frac{H_{\Lambda i}}{H_{ki}^{1,2}}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где λ_0 — длина волны ряби намагниченности при $H_{\Lambda} = 0$.

Изменение длины волны ряби намагниченности в зависимости от внешнего поля приведено на рис. 5, где сплошные кривые соответствуют

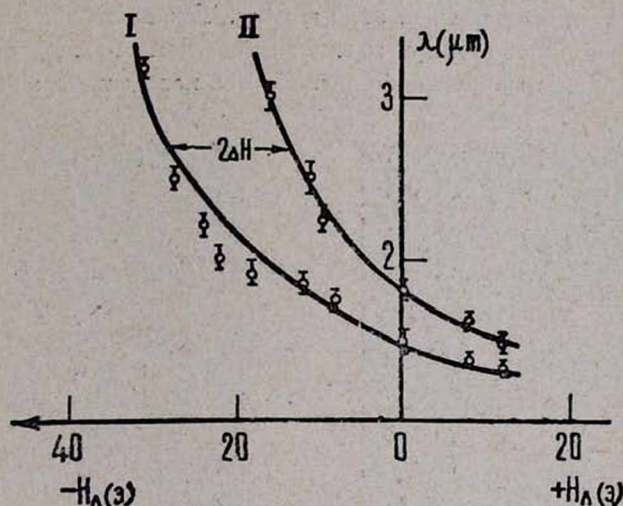


Рис. 5. Изменение длины волны ряби намагниченности под действием перемангничивающего поля: I — $\vec{H}_{\Lambda} \uparrow \downarrow \Delta \vec{H}$, II — $\vec{H}_{\Lambda} \uparrow \uparrow \Delta \vec{H}$.

уравнению (1) (для кривой I H_k подобрано равным 40 э, а для кривой II — 12 э); наблюдается хорошее совпадение эксперимента с уравнением (1). Если предположить применимость теории Гоффмана о ряби намагниченности к пленкам с ферро-антиферромагнитным взаимодействием, то согласно [14] справедливы соотношения

$$\lambda_0^1 = 2\pi \sqrt{\frac{A}{K_u + K_{ud}}}, \quad (2)$$

$$\lambda_0^2 = 2\pi \sqrt{\frac{A}{K_u}}, \quad (3)$$

где K_u — константа одноосной анизотропии, равная $\frac{H_k J}{2}$, K_{ud} — константа индуцированной однонаправленной анизотропии, равная $\Delta H J$ [3], A — константа обмена.

Подставляя найденные значения H_k и ΔH , получим соответственно $K_u = 4,8 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^3$, $K_{ud} = 1,1 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^3$. Оказывается, что в этом случае равенства (2) и (3) могут выполняться одновременно только при соответствующих значениях константы обмена

$$A_1 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ эрг/см}, \quad A_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ эрг/см}.$$

III аномалия. В отличие от обычных пермалловых пленок, в пленках с ферро-антиферромагнитным взаимодействием граница, возникающая при перемагничивании по ОЛН, способна смещаться только в одну сторону, т. е. если не насыщая пленку в одной полярности приложить поле обратной полярности, то имеющиеся в пленке границы не смещаются в направлении увеличения домена, а пленка будет перемагничиваться возникновением новых границ, соответствующих данной полярности приложенного внешнего поля, и дальнейшим смещением этих границ. Такое «странное» поведение границы хорошо видно как при магнитооптическом наблюдении (рис. 6), так и в электронном микроскопе (рис. 7). Это поведение границы не зави-

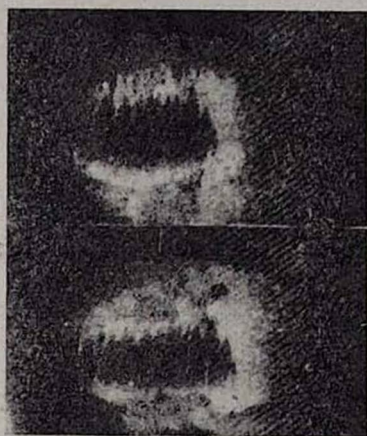


Рис. 6.

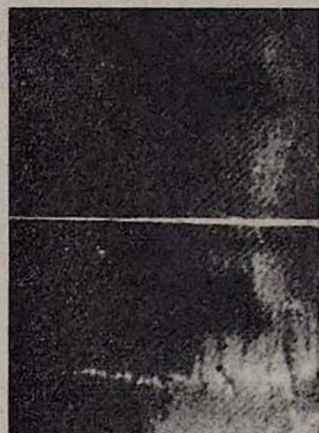


Рис. 7.

Рис. 6, 7. Возникновение новых перемагничивающих границ при перемагничивании пленок полями меньше H_c .

сит от последовательности приложения полей, параллельных или антипараллельных ΔH .

В пленках, имеющих сравнительно небольшую толщину, наряду с вышеуказанным аномальным поведением граница претерпевает также зигзагообразную деформацию. На рис. 8 приводится характерный участок перемагничивающей границы в пленках с ферро-антиферромагнитным взаимодействием. Возникновение зигзагообразной границы с поперечными связями в обычных пермалловых пленках наблюдалось нами и ранее [15], однако там это было обусловлено приложением растягивающих напряжений под углом $\approx 45^\circ$ к ОЛН и при обратимом характере этого процесса граница претерпевала деформацию, симметричную по обеим ее сторонам. В дан-

ном случае в отличие от [15] процесс необратим и, что не менее здесь важно, симметричности не наблюдается.



Рис. 8. Зигзагообразная деформация границы с поперечными связями при перемагничивании пленок в направлении ОЛН, $H_L = 15$ э.

Поскольку как в [15], так и здесь зигзагообразная деформация обусловлена структурой границы с поперечными связями, рассмотрим структуру последней в пленках с ферро-антиферромагнитным взаимодействием.

Схематическое изображение структуры доменной границы с поперечными связями в пленке с ферро-антиферромагнитным взаимодействием под действием поля H_L приведено на рис. 9. Известно, что граница с попереч-

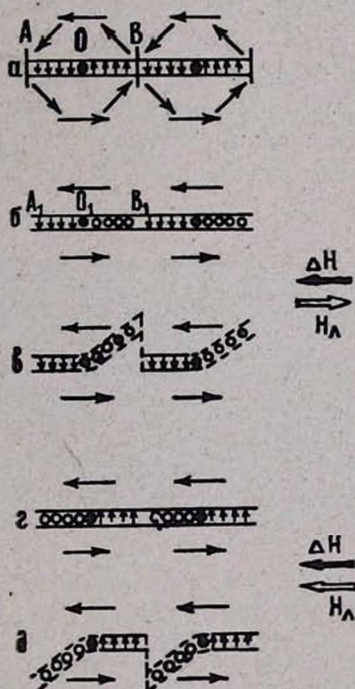


Рис. 9. Схематическое пояснение зигзагообразной деформации границы с поперечными связями в зависимости от взаимного расположения

$$\vec{H}_L \text{ и } \vec{\Delta H}.$$

ными связями представляет 90° неелевские сегменты AO и OB (рис. 9а), разделенные круговыми (O) и крестообразными (A, B) линиями Блоха [16]. Электронномикроскопические исследования показали, что в зависимости от направления $\Delta \vec{H}$ и полярности поля H_d разрыв границы происходит на различных неелевских сегментах границы. Иначе говоря, действие внешнего поля H_d не равнозначно на двух соседних неелевских сегментах, т. е. коэрцитивная сила смещения соседних неелевских сегментов как бы различна. При этом оказывается, что неелевский сегмент с благоприятным направлением вращения спинов к $\Delta \vec{H}$ имеет большую коэрцитивную силу смещения, чем соседний сегмент. На рис. 9 (б—д) сплошной линией указаны неелевские сегменты с большей коэрцитивной силой.

Наличие однонаправленного движения доменных границ, разрыв доменных границ с поперечными связями при перемагничивании пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием и факт большой коэрцитивной силы смещения границ в этом случае по сравнению с пленками до термомангнитного отжига указывают, что граница чувствительна к наличию ферро-антиферромагнитного взаимодействия в пленках. Это и понятно, так как в самой границе с поперечными связями спины по-разному прецессируют и по-разному будут взаимодействовать со спинами антиферромагнитного подслоя пленки.

В этом свете исследование структуры границы методом малоугловой дифракции электронов [17, 18], по-видимому, может дать дополнительные сведения о возможной структуре самой границы. Введение дополнительной системы стигматора в полость промежуточной линзы микроскопа УЭМВ-100К позволило просмотреть один и тот же участок пленки как в режиме дефокусирования с большим разрешением, так и в режиме малоугловой дифракции электронов.

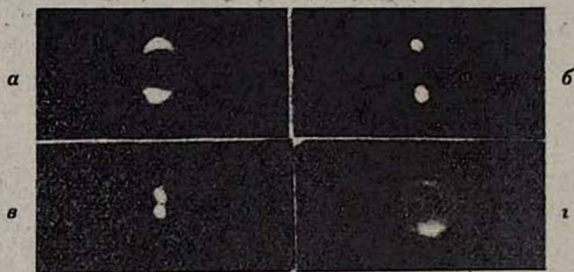


Рис. 10. Картины малоугловой дифракции от доменных границ: а — для границы с поперечными связями в одноосноанизотропной пленке; б — в поле $H_t = 0,6 H_k$; в — в поле $H_t = 0,8 H_k$; г — для границы в пленке с ферро-антиферромагнитным взаимодействием.

На рис. 10 приведена картина малоугловой дифракции электронов от границы с поперечными связями пленки состава $82/18 \text{ Ni/Fe}$. В отличие от [19], где апертура пучка порядка нескольких микрон давала возможность просмотреть отдельные участки границы (крестообразную и круговую ли-

нии Блоха), в нашем случае апертура ≈ 30 мк приводит к созданию суммарной усредненной картины дифракции. Судя по дифракционной картине рис. 10а, полученной с площади пленки диаметром 30 мк, прилегающей к границе, наряду с чисто 90° областями намагниченности (неелевские сегменты) имеются также и области, в которых компонента вектора намагниченности по ОЛН непрерывно уменьшается (наличие усиков у дифракционных пятен). Это обусловлено распределением намагниченности областей, примыкающих к круговой линии Блоха, где спины, прецессируя, выходят из плоскости пленки, уменьшая тем самым компоненту вектора намагниченности по ОЛН. При приложении поля по ОЛН $H_T = 0,6 H_K$, когда линии Блоха аннигилируют и граница переходит в чисто 90° границу Нееля [16], на дифракционной картине усики исчезают (см. рис. 10б). Дальнейший рост поля $H_T = 0,8 H_K$ приводит к сближению дифракционных пятен (рис. 10в). Последнее обусловлено уменьшением компоненты вектора намагниченности, параллельной ОЛН, которая ответственна за расщепление падающего на пленку электронного пучка.

Исследование доменной границы пленки с ферро-антиферромагнитным взаимодействием методом малоугловой электронной дифракции показало, что дифракционная картина в этом случае сильно отличается от картины в случае обычной пленки. Здесь мы имеем, в основном, подковообразную картину, показанную на рис. 10г.

Наличие дифракционных пятен подковообразной формы при отсутствии основных дифракционных пятен, как это видно из рис. 10г, указывает на то, что круговая линия Блоха границы не является центром симметрии прилегающих неелевских сегментов. По одну сторону от круговой линии Блоха (на рис. 9 отмечено темными кружками) вектор намагниченности, непрерывно меняя свое направление, прецессирует с выходом из плоскости пленки (участки границы O_1B_1 , рис. 9б, отмеченные светлыми кружками), а на соседнем участке A_1O_1 этот процесс отсутствует и переход намагниченности здесь осуществляется неелевской прецессией. При перемагничивании пленки граница претерпевает разрыв, в основном, на участках блоховской прецессии.

Возникает нечто странное—граница с поперечными связями из-за наличия ферро-антиферромагнитного взаимодействия переходит в новый тип границы, где один из сегментов является неелевским, а другой—блоховским, а при прочих равных условиях коэрцитивная сила блоховского участка меньше неелевского, что, по-видимому, и является причиной разрыва границы при ее смещении. Следовательно, при изменении полярности перемагничивающего поля более благоприятным является возникновение новой границы и ее смещение (рис. 6, 7). Как нами уже отмечалось, тогда блоховские и неелевские сегменты меняются местами (рис. 8). В этом свете предположение о блоховской прецессии вектора намагниченности при перемагничивании пленок с ферро-антиферромагнитным взаимодействием, содержащееся в [20], не лишено оснований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. W. H. Meiklejohn. J. Appl. Phys. Suppl., 33, 1382 (1962).
2. O. Massenet, S. Montmory, L. Neel. IEEE Trans. Magnet., 1, 63 (1965).
3. А. А. Глазер, А. П. Потапов, Р. Таиоров, Я. С. Шур. ФТТ, 10, 3022 (1966).
4. А. А. Глазер, А. П. Потапов, Р. Таиоров, Я. С. Шур. Сб. Физика магнитных пленок, Материалы международного симпозиума, 1968, Иркутск, стр. 190.
5. A. A. Glazer, A. P. Potapov, R. I. Tagirov, J. S. Shur. Phys. stat. sol., 16, 745 (1966).
6. Н. М. Саланский, Б. П. Хрусталева, А. А. Глазер. Сб. Физика магнитных пленок, Материалы международного симпозиума, 1968, Иркутск, стр. 207.
7. А. П. Потапов. Кандидатская диссертация, Свердловск, 1969.
8. O. Massenet, J. Devyni. Compt. Rend. Acad. Sci., Paris, 265 B, 605 (1967).
9. O. Bostonjoglo, P. Kreisel. Phys. stat. sol. (a), 7, 173 (1971).
10. H. Hoffmann. J. Appl. Phys., 35, 1790 (1964).
11. Я. М. Погосян. ФММ, 17, 678 (1964).
12. Я. М. Погосян. ФММ, 19, 38 (1965).
13. S. Methfessel, S. Middelhoek, H. Thomas. J. Appl. Phys., 32, 1959 (1961).
14. H. Hoffmann. Phys. stat. sol., 6, 733 (1964).
15. Я. М. Погосян, М. А. Ншанян, П. А. Безирианян. ФММ, 33, 179 (1972).
16. Я. М. Погосян, А. Г. Шичков, Р. В. Телескин. ФММ, 30, 880 (1970).
17. R. H. Wade, J. Silcox. Phys. stat. sol., 19, 63 (1967).
18. R. P. Ferrier. Bull. Soc. Mineral cristallogr., 90, 464 (1967).
19. В. И. Петров, Г. В. Спивак, О. П. Павлюченко. УФН, 106, 229 (1972).
20. М. Ш. Ерухимов. Кандидатская диссертация, Красноярск, 1971.

ՖԵՐՐՈ-ԱՆՏԻՖԵՐՐՈՄԱԳՆԵՏԻՍԱԿԱՆ ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՄԲ ԿԱՊԱԿՍԻ
ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՎԵՐԱՄԱԳՆԵՏՄԱՆ ՈՐՈՇ ԱՌԱՋԱՆՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՄԱՍԻՆ

ՅԱ. Մ. ՊՈԳՈՍՅԱՆ, Զ. Մ. ԳԶՐԻԱՆ

Աշխատանքը նվիրված է ֆերրո-անտիֆերրոմագնիսական փոխազդեցության կապված թաղանթների որոշ անոմալ հատկությունների (համեմատած սովորական պերմալլոյի թաղանթների հետ) էլեկտրոնամիկրոսկոպիկ հետազոտությանը: Ցույց է տրված, որ շնայած այս թաղանթների վերամագնիսացման ժամանակ մագնիսացման ծիանքի և ալիքի երկարության փոփոխությունը բավարարում է Հոֆմանի հավասարմանը, սակայն այս դեպքում միակողմանի անտիզոտրոպիայի դրսևության պատճառով λ -ի արտաքին H_A դատից կախվածության կորերը, որոնք համապատասխանում են ΔH -ին զուգահեռ և հակառակ ուղղությամբ վերամագնիսացմանը, շեղված են $2 \Delta H$ մեծությամբ: Հայտնաբերված է թաղանթներում գոյություն ունեցող դոմենային սահմանների միակողմանի շարժման երևույթ և բերվում է այդ երևույթի հնարավոր բացատրությունը:

ABOUT SOME PECULIARITIES OF THE REVERSAL
MAGNETIZATION OF FILMS AT
FERRO-ANTIFERROMAGNETIC INTERACTION

Ya. M. POGOSIAN, Z. M. GZRIAN

The paper is concerned with electron-microscopic study of some anomalous peculiarities (as compared to the ordinary Ni-Fe films) of the reversal magnetization of the films at ferro-antiferromagnetic interaction.