# ВОЗМОЖНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ РЯБИ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ НА СФОКУСИРО-ВАННЫХ ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

# Я. М. ПОГОСЯН, Д. ПЭЦОЛЬД, М. А. ЧАЛАБЯН, Т. А. ПОГОСЯН

Предлагается новая методика электронномикроскопического наблюдения тонкой магнитной структуры ферромагнитных пленок с помощью метода заслонки. Показано, что изображение магнитной структуры, полученное методом расфокусирования, можно имитировать наложением микрофотографий с определенным сдвигом их друг относительно друга, причем эти микрофотографии должны соответствовать определенным направлениям подведения заслонки.

#### 1. Введение

В настоящее время одним из объективных методов исследования магнитной структуры в тонких ферромагнитных пленках является лоренцова электронная микроскопия, интенсивное развитие которой способствовало созданию микромагнитной теории тонких пленок (теория ряби намагниченности [1, 2]). Обычно для исследования тонкой магнитной структуры применяется лишь одна из двух разновидностей лоренцовой микроскопии — метод расфокусирования [3], в то время, как другой метод — метод заслонки [4] — не нашел применения.

В предыдущей работе [5] нами было показано, что именно метод заслонки может быть успешно применен в комплексных исследованиях кристаллической и доменной структур ферромагнитных пленок, тогда как в методе расфокусирования получение какой-либо информации о кристаллической структуре пленок не представляется возможным не только для случая ферромагнитных веществ, но и в случае неферромагнитных образцов [6].

В настоящей работе обсуждается возможность применения метода заслонки для исследования тонкой магнитной структуры в ферромагнитных пленках.

### 2. Возможность наблюдения ряби намагниченности методом заслонки

Магнитную структуру тонких пленок можно наблюдать на сфокусированном электронномикроскопическом изображении небольшим смещением апертурной диафрагмы объективной линзы [4]. При этом образец устанавливается в держателе в приподнятом положении «высокого контраста» и освещается сходящимся электронным пучком [5]. В этом случае распределение интенсивности на изображении  $I' = I/I_0$  (где  $I_0$  — интенсивность в данной точке при обычном положении диафрагмы, а I — интенсивность в

171

той же точке, когда апертурная диафрагма смещена) зависит от взаимного расположения направления подведения заслонки и вектора намагниченности в домене и дается выражением [5]

$$I' = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\Delta'_0}{\Delta_T} - \frac{\beta f}{\Delta_T} \sin \varphi \right), \tag{1}$$

где  $\beta = (4\pi e\ It)/mv$  — угол лоренцова отклонения, I — вектор намагниченности, расположенный под углом Ф к внутренней нормали к краю заслонки (е и m — заряд и масса электрона, а v — скорость электронов),  $\Delta_0'$  расстояние «тени» края заслонки на задней фокальной плоскости объектива от центра дифракционного пятна с радиусом  $\Delta r$ , f — эффективное фокусное расстояние объективной линзы, t — толщина пленки.

Рассмотрим случай, когда в доменах имеются локальные колебания вектора намагниченности на угол  $\pm \Delta \phi$  (рябь намагниченности). Последнее приводит к изменению формы первичного пучка. Это иллюстрируется на рис. 1, где схематически приводится вид дифракционного пятна как в случае отсутствия ряби (рис. 1a), так и при наличии ряби (рис. 1b) для

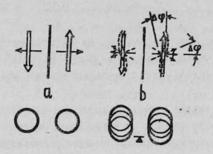


Рис. 1. Схематическое изображение формы дифракционных пятен: a-идеальная пленка, b-реальная ферромагнитная пленка; светлая стрелка указывает среднее направление вектора намагниченности, пунктир-локальные колебания вектора намагниченности,  $\Delta \phi$ —угол локального отклонения вектора намагниченности от среднего направления, -- направление отклонения электронов из-за силы Лоренца, соответствующей вектору намагниченности в среднем направлении, >! - направление подведения заслонки.

случая двух антипараллельных доменов. Как видно из рис. 16, при наличии локального колебания вектора намагниченности дифракционные пятна принимают вид эллипса с большей осью, параллельной оси легкого намагничивания. Очевидно, для того, чтобы разрешить тонкую магнитную структуру, приводящую к изменению формы пятна, заслонка должна быть подведена к центру дифракционного пятна в направлении оси легкого намагничивания. Это и следует из формулы (1), которая при учете локального колебания вектора намагниченности на угол  $\pm \Delta \phi$  принимает вид

$$I' + \Delta I'_{\text{рябь}} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\Delta'_0}{\Delta r} - \frac{\beta f}{\Delta r} \sin \left( \varphi \pm \Delta \varphi \right) \right). \tag{2}$$

При малых значениях  $\Delta \phi$  и  $\Delta_0' = 0$  (заслонка подведена на задней фокаль»

ной плоскости объектива до центра пятна) из выражений (1) и (2) можно получить

 $\Delta I_{\text{psob}} = \pm \frac{1}{2} \frac{\beta f}{\Delta r} \cos \psi \cdot \Delta \varphi. \tag{3}$ 

Видно, что изменение интенсивности изображения из-за ряби намагниченности максимально при  $|\cos \phi| = 1$ , т. е. когда диафрагма смещается вдоль оси легкого намагничивания ( $\phi = 0$ ,  $\pi$ ).

Возникает вопрос, в состоянии ли современные электронные микроскопы создавать контраст изображения, достаточный для разрешения\* небольших отклонений вектора намагниченности, обусловленных рябью?

Поскольку радиус дифракционного пятна равен  $\Delta r = \beta_0 f$ , где  $\beta_0 = \beta_{\text{конд.}} + \beta_{\text{крист.}}$  ( $\beta_{\text{конд.}}$  — угол расходимости пучка из-за конечного размера освещающего пятна первого конденсора,  $\beta_{\text{крист.}}$  — угол расходимости, обусловленный размерами кристаллитов, причем в силу  $\beta_{\text{крист.}} \ll \beta_{\text{конд.}}$  имеем  $\beta_0 \approx \beta_{\text{конд.}}$ ), то из (3) вытекает условие, необходимое для наблюдения ряби намагниченности,

$$\frac{1}{2} \frac{\beta}{\beta_0} \Delta \varphi_{\min} \geqslant 0, 1. \tag{4}$$

Оценки показывают, что при работе на электронном микроскопе высшего класса, где практически можно получать  $\beta_0 \sim 0.5 \cdot 10^{-4}_{pad}$ , и наблюдении образцов—пленок железа—этим методом можно разрешить области с колебаниями  $\Delta \phi \sim 1.5^\circ$ .

Здесь следует также учесть возможные ошибки, вносимые прибором. Одна из ошибок обусловлена неровностями края заслонки величиной б, приводящими к изменению интенсивности изображения данной точки на величину

$$\Delta I_{\delta} = \frac{1}{\beta_0 f_0} \frac{h + M}{h^2 + h + M} \delta. \tag{5a}$$

Здесь  $f_0$  — фокусное расстояние объектива при обычном положении образца «высокого разрешения»,  $h=R/f_0$  — параметр, показывающий насколько приподнят образец из положения «высокого разрешения», R — расстояние плоскости пленки от средней плоскости объектива,  $M=1-(1+1/M_0)/M_0$  — параметр, связанный с увеличением объективной линзы,  $M_0$  — увеличение объектива при  $f=f_0$ . Кроме того, контраст изображения меняется также с отходом наблюдаемой области от параксиального положения, поскольку, как было отмечено в [5], расстояние «тени» заслонки  $\Delta_0'$  зависит от координат  $(\rho,\alpha)$  наблюдаемой точки, вследствие чего интенсивность на изображении меняется от центра до края области радиусом  $\rho_{\text{max}}$  на величину

$$\Delta J_{\rm 2max} = \frac{1}{\beta_0 f_0} \frac{1}{h^2 + h + M} \rho_{\rm max}. \tag{56}$$

<sup>\*</sup> Для определенности считаем, что две области на изображении разрешаются по контрасту, если их интенсивности  $I_1^{'}$  и  $I_2^{'}$  удовлетворяют условию  $|I_1^{'}-I_2^{'}| > 0,1$ .

Для выявления контраста ряби намагниченности требуется, чтобы эти «приборные ошибки» не превышали 20% контраста, возникшего из-за ряби намагниченности, т. е. чтобы  $|\Delta I_{\hat{\epsilon}}'| + |\Delta I_{\hat{\rho}_{\max}}'| \leq 0,2 \, |\Delta I_{\text{рябь}}'|$ . Отсюда получаем достаточное условие для наблюдения ряби намагниченности

$$\Delta \varphi_{\min} \geqslant \frac{0.2}{\beta f_0} \frac{1}{h^2 + h + M} (\gamma_{\max} + (h + M) \delta).$$
 (6)

Оценки этих величин для микроскопа JEM = 100U, на котором проводились все экспериментальные исследования данной работы, с помощью условий (4) и (6) показывают, что для разрешения ряби намагниченности с  $\Delta \phi_{\min} \sim 1.5^{\circ}$  необходимо работать в режиме первого конденсора с наименьшим пятном и приподнять образец на  $R \sim 1$  см, т. е. установить в положение «высокий контраст» (третье положение) в держателе образца.

#### 3. Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Исследования проводились на «монокристаллических» пленках железа толщиной 500÷800 Å, полученных методом вакуумной конденсации на сколе каменной соли. При описанном выше режиме установления образца и подвода апертурной диафрагмы в направлении оси легкого намагничивания на фоне средней контрастности наблюдается полосовая картина. Период этих полос примерно порядка длины волны ряби намагниченности по Гофману [1]. На рис. 2 приведены снимки, полученные соответственно при обычном положении апертурной диафрагмы (рис. 2a) и при срезе пучка в направлении оси легкого намагничивания (рис. 2b). Видно, что наблюдаемый контраст действительно обусловлен наличием локального колебания вектора намагниченности. Эффект мог быть более наглядным, если бы мы убрали общий фон, обусловленный кристаллической структурой, налагая на позитив рис. 2а негатив рис. 26. Преимущество наблюдения рябн намагниченности на сфокусированных электронномикроскопических изображениях очевидно: здесь на кристаллическую структуру накладывается магнитная структура, и возможность получения информации эдесь безусловно больше.

Рассмотрим теперь связь между сфокусированным и расфокусированным изображениями магнитной структуры. Для наглядности нами взят участок пленки с 90°-ой доменной границей. При прохождении электронного пучка через этот участок в режиме сфокусированного изображения и подведении срезающей заслонки в направлении, соответствующем рис. За (для наглядности в верхней части рис. З светлыми стрелками показано среднее направление вектора намагниченности в соответствующих доменах, а сплошными стрелками — среднее направление силы Лоренца по отношению к направлению подведения заслонки), проходящий пучок г будет экранироваться соответственно случаю рис. 16, и на среднем фоне будет наблюдаться рябь намагниченности, тогда как пучок l проходит беспрепятственно и соответствующая ему область дает свое обычное изображение. Если

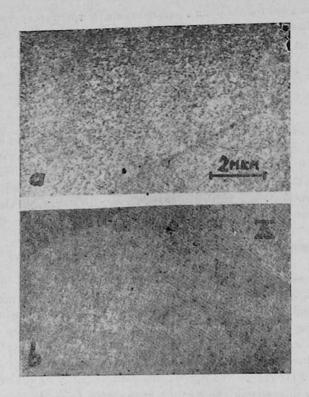


Рис. 2. Микрофотографии с одного и того же участка пленки железа: а—при обычном положении апертурной диафрагмы, b—заслонка подведена в направлении оси легкого намагничивания в даниом домене.

теперь вывести срезающий нож и подвести его под углом  $90^\circ$  по отношению к предыдущему положению, то, как видно из рис. 3b, контрастность картины изменится и рябь намагниченности будет наблюдаться в пучке l. Полученные изображения для этих двух случаев приведены на рис. 4a и b. Здесь на темных участках также видны колебания, что объясняется нестрогим соответствием направления подведения заслонки с направлением оси легкого намагничивания. Кроме того, здесь, по-видимому, сказывается и форма края заслонки — в нашем случае ножом служила круглая апертурная диафрагма диаметром 20 мкм. Рассмотрим теперь этот же участок пленки на расфокусированном изображении. Как видно из рис. 3c, этот режим отличается от предыдущих (сфокусированных) тем, что здесь на экран попадают пучки от обеих областей (r и l) пленки. При этом наблюдаемое изображение на плоскости S'' будет представлять собой наложение картин, соответствующих режимам рис. 3a и b, смещенных друг относительно друга на величину 2s, которая зависит от степени расфокусировки z'.

На рис. 4d приведена микрофотография доменной структуры, полученная в режиме расфокусирования. На справедливость принятой нами выше схемы указывает рис. 4c, который был получен наложением смещенных

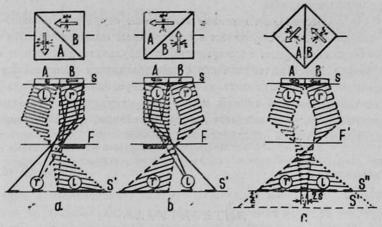


Рис. 3. Схематическое объяснение принципа обнаружения тонкой магнитной структуры: а и b соответствуют методу заслонки, с—методу расфокусирования; S—плоскость образца, S'—плоскость сфокусированного изображения образца, S"—плоскость расфокусированного изображения( т. е. плоскость, смещенная относительно S' вдоль оптической оси на величину z'), F—задняя фокальная плоскость объектива (соответствующая сфокусированному режиму работы микроскопа), F'—фокальная плоскость, соответствующая расфокусированному режиму, 2s—величина, характеризующая степень перекрытия пучков r и l из-за расфокусирования (то же, что и наблюдаемая ширина границ при данной степени расфокусировки).

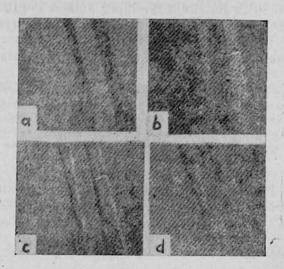


Рис. 4. Микроснимки магнитной структуры с  $90^{\circ}$ -ми доменными границами, полученные методом заслонки (a, b) наложением двух изображений при подведении заслонки с противоположных сторон (c) и при расфокусированном режиме работы микроскопа (d), увеличение $\times$ 1000. Как видно, наложение двух изображений a и b со смещением обеих пластинок навстречу друг другу воспроизводит недофокусированное изображение d.

друг относительно друга рис. 4а и b. Рис. 4с фактически воспроизводит картину при недофокусировке.

В свете вышесказанного тонкая магнитная структура пленок, наблюдаемая методом расфокусирования в электронном микроскопе, есть некоторый усредненный эффект, возникающий в результате наложения некоторого числа колебаний интенсивности с определенными сдвигами фаз (т. е. перемещением их друг относительно друга, обусловленным степенью расфокусирования). Анализ тонкой магнитной структуры, наблюдаемой в электронном микроскопе методом расфокусирования, с этой точки зрения можеть стать предметом отдельного обсуждения.

Ереванский государственный университет

Поступила 16.IV.1975

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. H. Hoffman. J. Appl. Phys., 35, 1790 (1964); Phys. Kond. Materie, 2, 32 (1964).
- 2. H. Rother. Z. Phys., 179, 229 (1964).
- 3. H. W. Fuller, M. E. Hale. J. Appl. Phys., 31, 238 (1960).
- 4. H. W. Fuller, M. E. Hale. J. Appl. Phys., 31, 1699 (1960).
- Я. М. Погосян и др. Ияв. АН АрмССР, Физика, 10, 291 (1975).
- 6. F. Thon. Z. Naturforschg., 20a, 154 (1965).

# ԲԱՐԱԿ ՖԵՐՈՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԾՓԱՆՔԻ ԴԻՏՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՖՈԿՈՒՍԱՑՎԱԾ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՄԱՆՐԱԴԻՏԱԿԱՅԻՆ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ ՎՐԱ

S. Մ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Դ. ՊԵՑՈԼԴ, Մ. Ա. ՉԱԼԱԲՑԱՆ, Թ. Ա. ՊՈՂՈՍՅԱՆ

Աշխատանքում առաջարկված է նոր մեթոդ ֆերոմագնիսական թաղանթների նուրբ մագնի\_ սական կառուցվածքը դիտելու համար, որը հիմնված է էլեկտրոնային մանրադիտակում էլեկտրոնային փունջը կտրելու վրա։ Ցույց է տրված, որ ապաֆոկուսացման մեթոդով դիտվող նուրը մագնիսական կառուցվածքի պատկերը կարելի է վերարտադրել այս եղանակով ստացված մի քանի պատկերների վերադրումով, որոնք որոշակիորեն շեղված են միմյանց նկատմամը։

# THE POSSIBILITY OF MAGNETIZATION RIPPLE OBSERVATION IN THIN FERROMAGNETIC FILMS BY MEANS OF IN-FOCUS ELECTRON MICROSCOPIC IMAGES

Ya. M. POGOSYAN, D. PÄTZOLD, M. A. CHALABYAN, T. A. POGOSYAN

The in-focus method of the electron microscopic observation of a magnetization ripple in thin ferromagnetic films is proposed. It is shown, that out-focus image of the magnetic structure might be imitated by the overlap of some in-focus patterns.