

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЛЕНОК В СЛУЧАЕ НЕЛИНЕЙНОЙ РЯБИ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Я. М. ПОГОСЯН, С. Д. ГЕВОРКЯН

Методом лоренцевой микроскопии исследуется микромагнитная структура пленки в состоянии недонасыщения под действием полей, приложенных перпендикулярно к поверхности образца. Показано, что по ширине возникших при этом каналов вектор намагниченности претерпевает изменение направления по сложной схеме блох-неелевской прецессии спинов. На это указывает изменение изображения конфигурации линий ряби намагниченности в каналах по мере увеличения степени расфокусирования изображения.

Безынерционность, высокое разрешение и возможность визуализации магнитной структуры сделали метод лоренцевой микроскопии одним из объективных методов исследования ферромагнитных пленок. С помощью лоренцевой микроскопии впервые удалось наблюдать в пленках тонкую магнитную структуру (рябь намагниченности), обусловленную локальными колебаниями вектора намагниченности около среднего направления намагниченности [1, 2]. Методика расшифровки лоренцевых электронных микрофотографий довольно проста: в каждой локальной области вектор намагниченности ($\mathbf{J}$) устанавливается по направлению нормали к тонкой магнитной структуре, а полярность J легко установить по контрасту изображения доменных границ, зная при этом режим наблюдения (недофокусирование или перефокусирование).

Отметим, что при интерпретации лоренцевых электронных микроснимков принимается, что амплитудное значение J по всей поверхности пленки постоянно. Задача намного усложняется, когда компонента J_x вектора намагниченности, лежащая в плоскости пленки и обуславливающая лоренцово отклонение, претерпевает локальное амплитудное изменение, что приводит к усложнению конфигурации ряби намагниченности (нелинейная рябь намагниченности).

Аналогичная ситуация возникает при перемагничивании пленок в направлении, перпендикулярном к поверхности образца, при котором $\mathbf{J}$ совершает неоднородное вращение и создаются магнитные каналы [3, 4].

Если в случае обычной ряби (когда $\mathbf{J}$ лежит в плоскости пленки) угол лоренцова локального отклонения электронов от среднего направления, приводящего к формированию изображения тонкой магнитной структуры, равен

$$\beta = \sqrt{\frac{e}{2mu}} d J_x \sin \bar{\varphi}, \quad (1)$$

где e и m — соответственно заряд и масса, d — толщина пленки $\bar{\varphi}$ — средний угол локального отклонения намагниченности от ОЛН, то в случае нелинейной ряби, возникающей из-за неоднородного поворота $\mathbf{J}$ к оси z , угол лоренцова отклонения зависит также от локального изменения ампли-

тудного значения намагниченности насыщения, пропорционального $\cos\psi$ (ψ — угол между направлением $\mathbf{J}$ и плоскостью пленки).

В настоящей работе исследуется распределение вектора намагниченности в пленке по лоренцовым электронным микрофотографиям, полученным при перемагничивании пленок в направлении, перпендикулярном к плоскости образца (направление z).

Исследовались обычные пермаллоевые пленки состава 80/20—Ni/Fe толщиной $300 \div 1200 \text{ \AA}$ под действием внешних полей, приложенных в направлении z . В качестве перемагничивающего поля использовалось магнитное поле объективной линзы электронного микроскопа JEM-100U. Образец устанавливался в свое обычное положение высокого разрешения, магнитный контраст создавался расфокусированием изображения с помощью конденсорной и промежуточной линз таким образом, что изменение тока объективной линзы приводило лишь к изменению эффективного увеличения микроскопа, не вызывая при этом существенного дополнительного расфокусирования изображения. Электронномикроскопические исследования показали, что при величинах полей $H_z = 0,6 \div 1,0 \text{ кэ}$, соответствующих состоянию недонасыщения, формируются узкие каналы, где четко видна тонкая магнитная структура (рябь намагниченности), тогда как вне каналов рябь намагниченности отсутствует.

На рис. 1 приводятся лоренцовы электронные микрофотографии магнитной структуры одного и того же участка пленки в состоянии недонасыщения в направлении z при двух различных степенях перефокусирования ($г, д$) и недофокусирования ($б, в$). Для сравнения приведен и снимок в режиме фокусирования ($а$). На рисунках четко видны каналы, особенно при более сильной степени расфокусирования, и линии Блоха в них [3]. При небольшой же степени недофокусирования или перефокусирования сами каналы не имеют четкой доменной границы (см., например, микрофотографию $г$), что указывает на отсутствие дивергенции намагниченности на границах каналов.

Формирование изображения границ каналов при больших степенях расфокусирования является результатом различия в величине компоненты J_x вектора намагниченности в плоскости пленки в каналах и вне каналов: если вне каналов $\mathbf{J}$ практически устанавливается в направлении z , то в самих каналах $\mathbf{J}$ ориентирован под углом ψ к оси z . Возникновение же нелинейной ряби намагниченности в каналах указывает на неоднородность магнитной структуры.

Характерной особенностью, сильно затрудняющей интерпретацию магнитной структуры в каналах, является и то, что хотя в двух соседних каналах средние направления векторов намагниченности параллельны, но рябь намагниченности в этих каналах имеет различную конфигурацию, что видно, например, из рис. 1б, где на участках каналов A и B линии ряби описывают соответственно «минимумы» и «максимумы», что обусловлено различием микромагнитной структуры в двух соседних каналах. На это указывает также тот экспериментальный факт, что при перемагничивании этих каналов в поле H_z , действующем в плоскости пленки, в одном кана-

ле предпочтительнее возникновение и смещение «круговой линии» Блоха в соседнем — «крестообразной линии» Блоха.

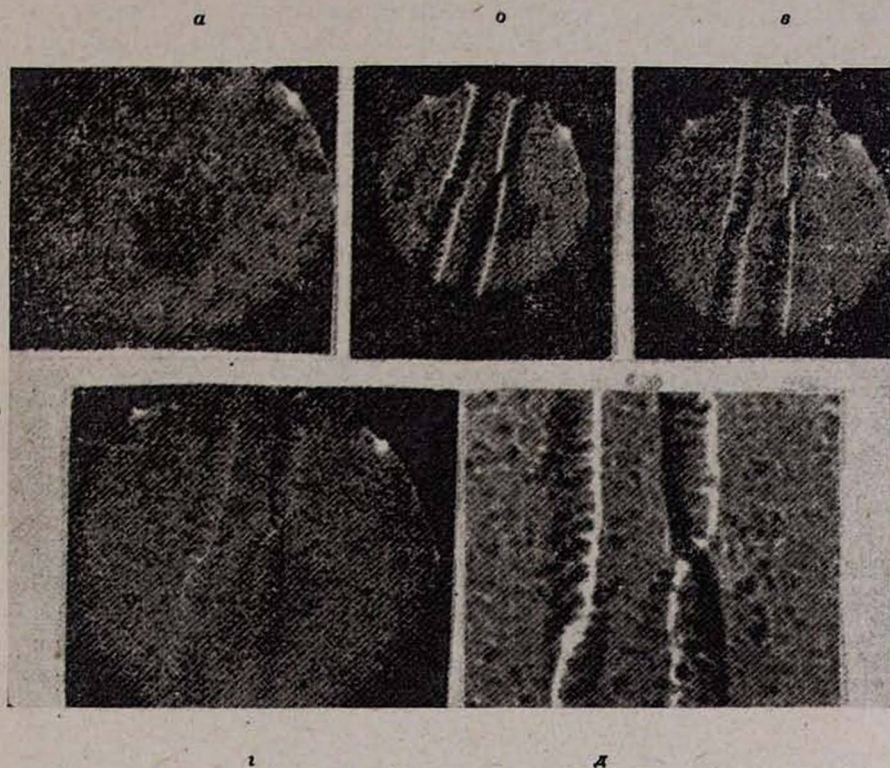


Рис. 1. Лоренцовы электронные микрофотографии состояния каналирования:
а — режим фокусирования; б→в — растет степень недофокусирования;
г→д — растет степень перефокусирования.

Судя по рис. 1, рост степени расфокусирования наряду с увеличением контраста изображения границ приводит к «деформации» линий ряби намагниченности в каналах: максимумы и минимумы линий ряби намагниченности смещаются от центра канала в сторону конвергентно изображенной границы, как это видно из микрофотографий г, д. «Деформация» линий ряби при увеличении степени расфокусирования (как при недофокусировании, так и при перефокусировании) характерна для нелинейной ряби намагниченности; в случае же обычной линейной ряби [5] изменение степени расфокусирования вызывает лишь изменение длины волны ротервской дисперсии намагниченности [6, 7], в то время как гофмановское колебание намагниченности [8, 9] остается постоянным. Естественно, наблюдаемая деформация нелинейной ряби намагниченности в каналах с увеличением степени расфокусирования должна быть обусловлена локальным распределением J_x в каналах. В соответствии с рис. 2 примем, что в каналах осуществляется блоховская прецессия спинов (позиция 1), причем в одном канале от края канала к центру J_x растет (серия А), тогда как в соседнем канале, наоборот, J_x уменьшается (серия В) (на рис. 2 стрелка-

ми указано изменение компоненты J_x по ширине канала, тонкие линии здесь изображают линии ряби намагниченности при незначительной степени расфокусирования, жирные линии — ожидаемую деформацию линий ряби при увеличении степени расфокусирования, причем обозначения каналов на рис. 1 и 2 совпадают). При таком распределении намагниченности (позиция 1) легко видеть, что увеличение степени расфокусирования на самом деле вызывает формирование изображения границ каналов (заштрихованные области рис. 2), а также деформацию линий ряби. Но характер

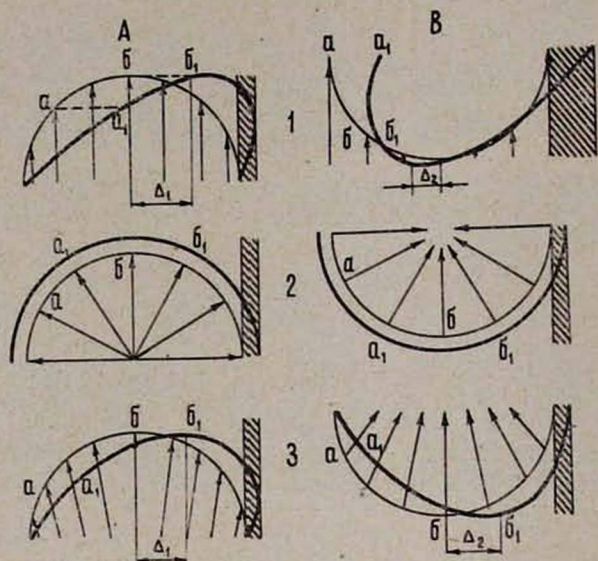


Рис. 2. Схематическое изображение возможной «деформации» линий ряби намагниченности в двух соседних каналах А и В, соответствующих рис. 1б, при изменении степени расфокусирования: 1 — блоховская прецессия, 2 — неелевское вращение, 3 — смешанная блох-неелевская прецессия; Δ_1 и Δ_2 — смещение точки на изображении при увеличении степени расфокусирования соответственно для максимума и минимума конфигурации линий ряби намагниченности.

этой деформации не похож на экспериментально наблюдаемую деформацию. Если в случае рис. 2А имеется некоторое сходство с изображением тонкой магнитной структуры в канале А рис. 1б, то в случае В рис. 2 оно отсутствует. При построении расфокусированного изображения, принцип которого хорошо виден из приведенного рис. 2, принимается, что при расфокусировании под действием лоренцовых сил изображение каждой материальной точки на экране смещается на величину, пропорциональную $J \cos \psi$, в направлении, перпендикулярном J_x : точка «а» переходит в «а₁», а точка «б» — соответственно в «б₁» и т. д.

Примем теперь, что нелинейная рябь в каналах обусловлена локальными изменениями намагниченности по типу Нееля, рис. 2 (2). При этом в канале А векторы намагниченности расходятся от центра канала, а в соседнем — сходятся к центру. Нетрудно видеть, что такое распределение

при увеличении степени расфокусирования хотя и может вызвать эффект появления изображения границ каналов, но рябь при этом не будет претерпевать «деформации»: здесь рост степени расфокусирования может вызвать лишь изменение кривизны линий ряби намагниченности.

Рассмотрим, наконец, последний возможный вариант распределения векторов намагниченности в каналах, представляющий смешанный вариант двух предыдущих (рис. 2(3)): от точки к точке по ширине канала имеется как компонента блоховской прецессии спинов, так и компонента неелевского вращения. Легко видеть, что в этом случае имеется согласие между полученным электронномикроскопическим расфокусированным изображением рис. 1б и рис. 2(3). Линии ряби намагниченности деформируются и максимумы кривых ряби А и В рис. 2(3) всегда смещаются в сторону



Рис. 3а.

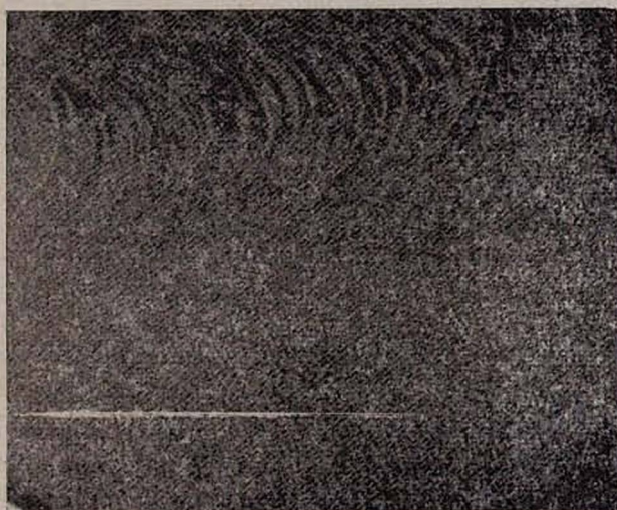


Рис. 3б.

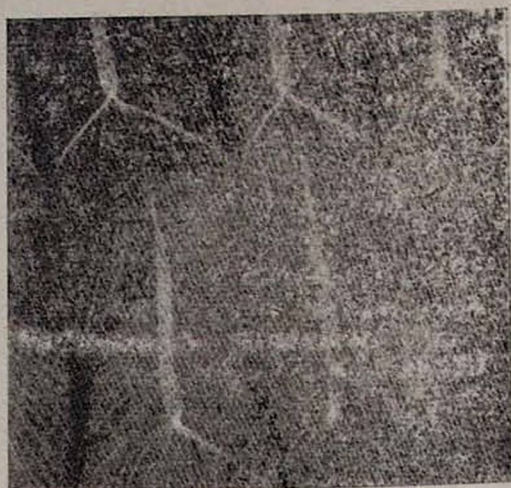


Рис. 3а.

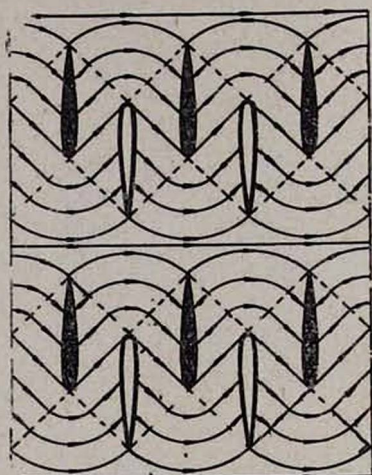


Рис. 3б.

Рис. 3. Электронномикроскопическое изображение состояния пленки, соответствующего различным величинам поля H_z : а — $H_z = 1,0 \text{ кэ}$, б — $H_z = 0,7 \text{ кэ}$, в — $H_z = 0$; 1 — схематическое изображение микрофотографии в (ОЛН горизонтальна).

конвергентно изображенной границы (рисунок построен для случая недофокусирования, но нетрудно видеть, что при перефокусировании изменения формы кривых ряби будут аналогичными, но смещенными в обратную сторону, где изображение границы канала становится конвергентным). Из приведенной на рис. 2 схемы следует, что, действительно, микромагнитная структура в двух соседних каналах различна: если в канале А от центра к краям наряду с уменьшением величины J_x векторы намагниченности расходятся (дивергентный канал), то в канале В, хотя характер амплитудного изменения намагниченности J_x аналогичен с каналом А, векторы намагниченности сходятся к центру (конвергентный канал). Не вдаваясь де-

тально в причину такого различия в локальном распределении намагниченности в каналах, отметим, что оно диктуется благоприятностью вклинивания структуры каналов в общую магнитную структуру. Отметим, что различие в поведении двух соседних каналов действительно наблюдается, например, при уменьшении амплитуды внешнего приложенного поля H_z : установление вектора намагниченности в плоскости пленки в дивергентном канале осуществляется уширением канала и соответствующим уменьшением кривизны линий ряби намагниченности, в то время как в конвергентном канале по мере уменьшения амплитуды поля H_z растет энергия ряби намагниченности, рис. 3а, б, и линии ряби переходят в отрезки границ типа Нееля, как это хорошо видно из рис. 3в и его схематического изображения 2.

Ереванский государственный
университет

Поступила 18.VII.1978

ЛИТЕРАТУРА

1. H. W. Fuller, M. Hall. J. Appl. Phys., 31, 238 (1960).
2. E. Fuchs. Naturwissenschaften, 47, 392 (1961); Zs. angew. Phys., 13, 157 (1961).
3. Я. М. Полосян, С. Д. Геворкян, Р. Штраубель. Phys. Stat. Sol. (a), 49, K3 (1978).
4. Я. М. Полосян, С. Д. Геворкян, Т. А. Погосян. ФММ, 47, 875 (1979).
5. Х. Гоффман. Дискуссия на Международном симпозиуме по физике магнитных пленок, Иркутск, 1968.
6. H. Rother. Z. Phys., 168, 42 (1962).
7. H. Rother. Z. Phys., 179, 229 (1964).
8. H. Hoffmann. Phys. Kond. Materie, 2, 32 (1964).
9. H. Hoffmann. J. Appl. Phys., 35, 1970 (1964).

ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՄԻԿՐՈՄԱԳՆԵՏԻՍԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՄԱԳՆԵՏԻՍԱՑՄԱՆ ԾՓԱՆՔԻ ԴԵՊՓՈՒՄ

Յա. Մ. ՊՈԳՈՍՅԱՆ, Ս. Դ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

Աշխատանքում լորենցյան միկրոսկոպիայի մեթոդով ուսումնասիրված է չհագեցման վիճակում գտնվող թաղանթի միկրոմագնիսական կառուցվածքը նմուշի մակերևութին ուղղահայաց կիրառված դաշտերի ազդեցության տակ: Ցույց է տրված, որ այդ պայմաններում առաջացող կանալների լայնությամբ մագնիսացման վեկտորը կրում է Բլոխ-Նեելի բարդ սխեմային համապատասխանող ուղղության փոփոխություն: Այդ մասին է վկայում կանալներում մագնիսացման ծփանքի գծերի կոնֆիգուրացիաների փոփոխությունը պատկերի ապաֆոկուսացման աստիճանը մեծացնելուն զուգընթաց:

THE INVESTIGATION OF MAGNETIC MICROSTRUCTURE OF THE FILMS IN THE CASE OF NON-LINEAR RIPPLE MAGNETIZATION

Ya. M. POGOSYAN, S. D. GEVORGYAN

With the help of Lorentz microscopy the micromagnetic structure of an ordinary permalloy film is investigated in the channeling state, arising at the undersaturation of the film in the direction normal to the sample plane. The distribution of magnetization vector direction along the channel width was estimated by the change of the configuration of magnetization ripple lines with the degree of the instrument defocusing.