ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ, 2020, том 121, № 5, с. 458–461

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.624

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЕНОК ПЕРМАЛЛОЯ С ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ДОМЕННЫМИ СТЕНКАМИ

© 2020 г. В. П. Панаэтов*

ФБГУ Высокогорный Геофизический институт (ВГИ), пр. Ленина, 2, Нальчик, 360030 Россия

**e-mail: Vladimir.panaetov@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.06.2019 г.
После доработки 19.11.2019 г.
Принята к публикации 22.11.2019 г.

На примере тонких пленок $Fe_{0.25}Ni_{0.75}$ исследованы закономерности формирования магнитной структуры вблизи систем блох-неелевских доменных стенок, реализующиеся в присутствии внешнего магнитного поля. Установлено, что при намагничивании пленки вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) около сблизившихся доменных стенок образуется устойчивое квазизамкнутое распределение намагниченности (блокированная доменная структура). Под действием поля, ориентированного перпендикулярно ОЛН, блокированная доменная структура трансформируется в систему локализованных доменов. Предложена модель, обосновывающая наблюдаемый переход.

Ключевые слова: домен, доменная стенка с поперечными связями, ось легкого намагничивания, ось трудного намагничивания

DOI: 10.31857/S0015323020050101

ВВЕДЕНИЕ

Развитие спинтроники нуждается в понимании процесса, происходящего при намагничивании ферромагнитных тонких пленок. Для дальнейших разработок устройств на ферромагнитных пленках требуется изучить процесс перестройки доменной структуры при намагничивании стенок с поперечными связями. Стенки с поперечными связями исследовали в [1–5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследованы пленки пермаллоя толщиной $t \sim$ ~ 40 нм, полученные методом термического испарения сплава $Fe_{0.25}$–$Ni_{0.75}$ ($\lambda_s > 0$) в вакууме на свежие сколы монокристаллов NaCl в постоянном магнитном поле. При проведении измерений магнитное поле изменяли в интервале 0–8000 А/м [6]. В размагниченном состоянии изображение доменных стенок с поперечными связями приведено на рис. 1. Стенки с поперечными связями не взаимодействуют между собой. Это проявляется в том, что поперечные связи на доменной стенке (ДС) плавно переходят в “рябь намагниченности”, нет искривлений поперечных связей, нет изгибов ДС. Рябь намагниченности играет важную роль в определении направлений векторов намагниченности в любом месте магнитной структуры.

Вектор намагниченности направлен перпендикулярно ряби намагниченности в данном месте [7]. Векторная схема распределения векторов намагниченности магнитной структуры в доменах и доменных стенках рис. 2а, приведена на рис. 2в.

О направлении векторов намагниченности в центрах стенок подробно излагается в работе [8]. Пленки перед наблюдением размагничивали переменным магнитным полем. Затем прикладывали постоянное магнитное поле вдоль ОЛН, и наблюдали процесс смещения ДС до появления взаимодействия между ДС. Стенки с поперечными связями (рис. 2а) взаимодействуют между собой. Поперечные связи соседних стенок замкнулись на круговые линии Блоха. На рис. 2а видно, что

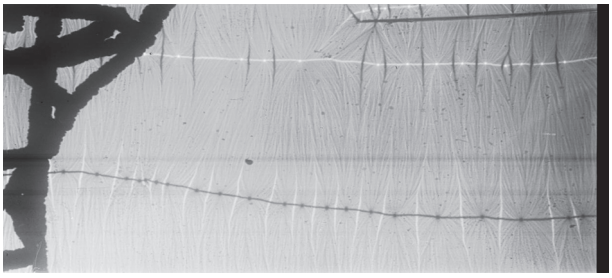

Рис. 1. Изображение невзаимодействующих доменных стенок с поперечными связями.

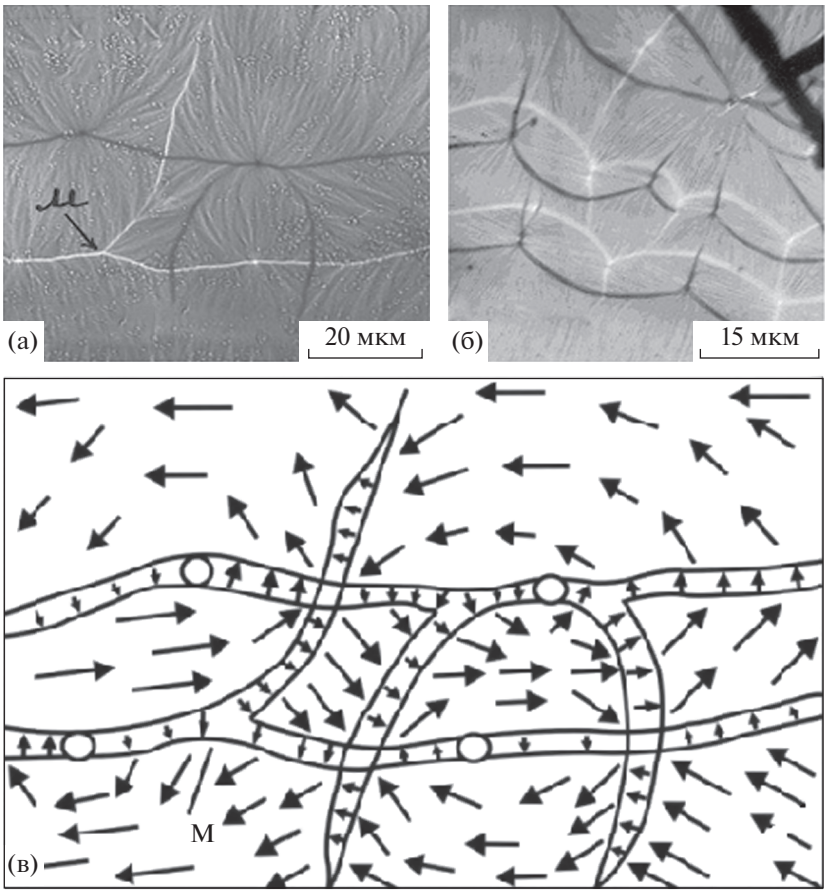

Рис. 2. Взаимодействующие доменные стенки с поперечными связями: а – наибольшее расстояние между доменными стенками, когда проявляется взаимодействие; б – минимальное расстояние между доменными стенками, когда стенки изгибаются дугообразно; в – схема распределения векторов намагниченности для магнитной структуры, показанной на рис. 2а.

на круговую линию Блоха замыкается одна поперечная связь (белая), а на другую стенку замыкаются две поперечные связи (черные). На рис. 3а видно, как на одну круговую линию Блоха замыкаются три и четыре поперечные связи.

Чем меньше расстояние между ДС, тем больше искривление ДС. Искривление ДС хорошо видно на рис. 2б. Участки стенок приобрели дугообразный вид. ДС сдвинуты максимально близко настолько, что дальнейшее увеличение магнитного поля уничтожит эту структуру. Поля рассеяния от отдельных участков ДС складываются и создают конфигурацию доменных структур рис. 2б.

На рис. 2в показана схема распределения векторов намагниченности в доменах и стенках. Эта схема дает возможность понять возникновение дугообразных участков ДС. Две пары стенок с поперечными связями сблизились настолько, что отдельные участки стенок этих пар испытывают отталкивание, а другие участки ДС – притяжение, что и привело к характерному дугообразному “волновому” виду доменной структуры. При сближении стенок с поперечными связями было измерено поле смещения $H_{см}$, т.е. минимальная величина внешнего магнитного поля, приложенного вдоль ОЛН, при котором наблюдали сдвиг стенок по отношению друг к другу. Зависимость $H_{см}$ от расстояния между стенками приведена на рис. 4а (исследованы пленки с величиной поля анизотропии $H_к$ = 160 и $H_к$ =1200 А/м). Для изменения поля анизотропии образцы растягивали с помощью специального штатного устройства в электронном микроскопе вдоль ОЛН. Плотность пар Блоха при деформации резко увеличивалась (рис. 3б). Штриховой линией показана величина поля смещения стенки с поперечными связями в том положении, когда влиянием соседних стенок на нее можно пренебречь. На первом этапе намагничивания пленки, когда расстояние между стенками было достаточно большим, при сближении стенок их структура практически не изменяется. Некоторые изменения структуры

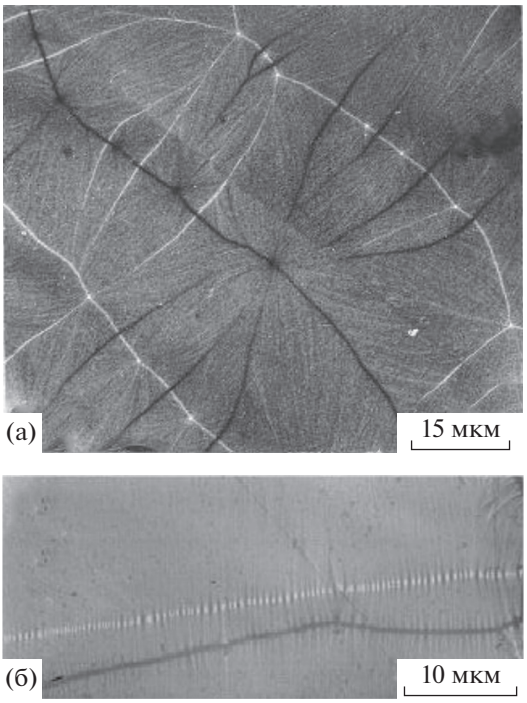

Рис. 3. Фотографии, иллюстрирующие взаимодействие доменных стенок с поперечными связями: а – наибольшее расстояние между доменными стенками, когда проявляется взаимодействие; б – доменная структура пленки после приложения к ней внешней нагрузки. $s_{кр}$ = 15 мкм; $H_к$ = 2400 А/м.

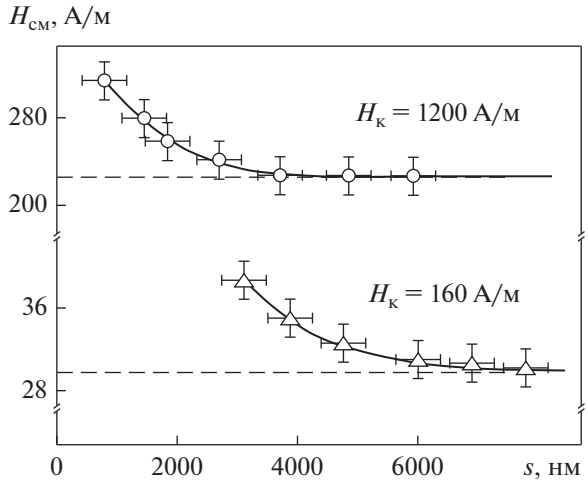

Рис. 4. Зависимость поля смещения $H_{см}$ для стенок с поперечными связями от расстояния между ними.

наблюдали только в локальных участках пленки из-за наличия в них различного типа дефектов и неоднородностей. При дальнейшем сближении стенок наступает момент, когда поперечные связи одной стенки начинают замыкаться на круговые линии другой ($s = s_{кр}$) (рис. 3а). За величину $s_{кр}$ было взято минимальное расстояние между участками двух соседних стенок. При $s_{кр}$ крестообразные и круговые линии Блоха еще не замыкаются. Для случая, представленного на рис. 2а (до приложения нагрузки), $s_{кр}$ ~ 75 мкм.

Несколько поперечных связей при намагничивании замыкаются на круговую линию Блоха и образуют систему доменов, в которых происходит плавный разворот векторов намагниченности в доменах, по сравнению с той магнитной структурой, которая была до замыкания поперечных связей на круговую линию Блоха. Разворот векторов намагниченности приводит к уменьшению магнитостатической энергии пленки. Следует заметить, что под действием механических напряжений, повышающих поле анизотропии $H_к$, также происходит увеличение поля $H_{ст}$.

На рис. 5а приведено изображение взаимодействующих ДС, полученных смещением их вдоль ОЛН. На рис. 5б представлена схема распределения векторов намагниченности в ДС. Цифрами *1* и *2* на схеме обозначены участки ДС, на которых направление векторов намагниченности в ДС совпадает с направлением приложенного поля H_1 и не совпадает. При определенной величине поля H_1 (H_1 = 560 А/м), приложенного вдоль ОТН, эти участки ДС стираются. Для стирания доменных стенок, обозначенных на схеме цифрой *2*, необходимо, чтобы поле H_2 было больше H_1, так как векторы намагниченности на этих участках направлены противоположно направлению внешнего поля. В результате нижняя пара ДС разделилась на отдельные домены, изображенные на рис. 5в и схематично на рис. 5г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приводятся результаты исследования намагничивания стенок с поперечными связями в тонких пленках пермаллоя вдоль осей легкого и трудного намагничивания.

Показано, что с уменьшением расстояния между доменными стенками происходит замыкание поперечных связей на круговые линии Блоха. Поэтому величина поля старта поперечной связи резко возрастает с уменьшением расстояния между стенками. При расстоянии между стенками, равном длине поперечной связи, поле старта $H_{ст}$ практически равно полю анизотропии. Таким образом, можно заключить, что стенки с поперечными связями начинают взаимодействовать между собой на более далеких расстояниях, чем однородные. Расстояние, на котором следует учитывать взаимное влияние, примерно равно длине поперечной связи. При уменьшении расстояния между стенками с поперечными связями, с момента замыкания по-

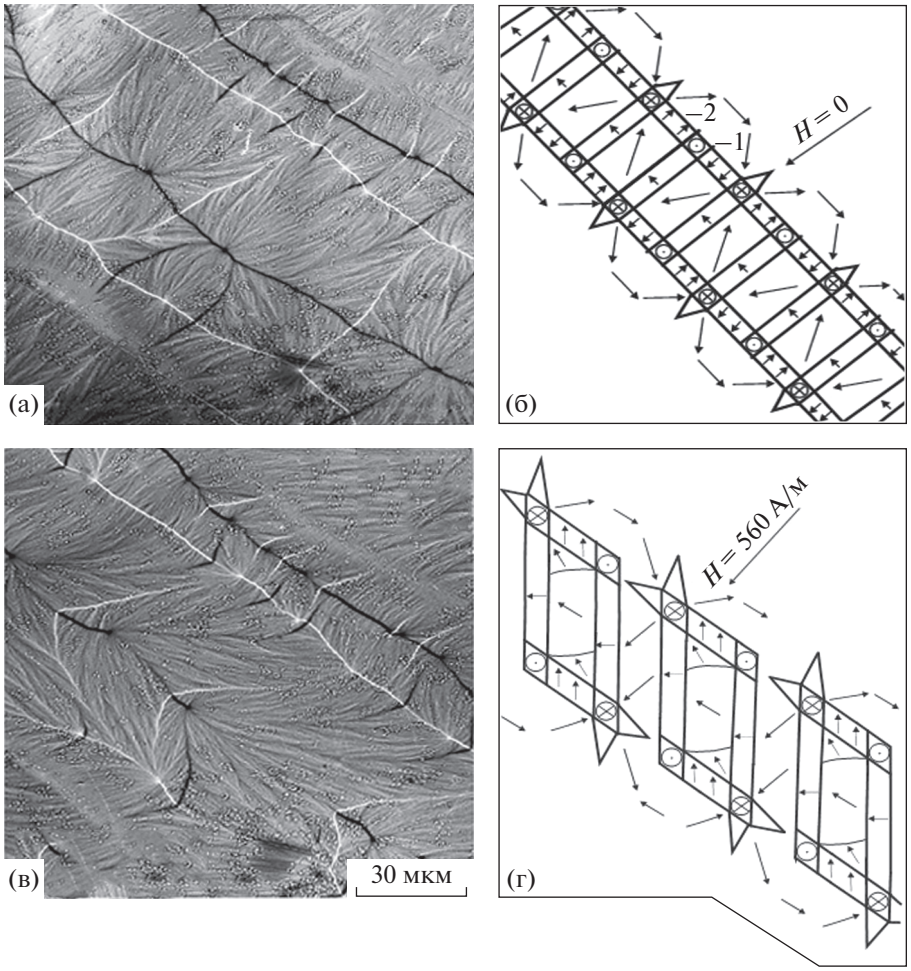

Рис. 5. Фотографии и схемы, иллюстрирующие перестройку магнитной структуры при намагничивании пленки вдоль оси трудного намагничивания: а – две пары взаимодействующих стенок с поперечными связями ($H = 0$); б – диаграмма распределения векторов намагниченности в доменных стенках, ($H = 0$); в, г – то же для $H = 560$ А/м.

перечных связей на круговые, наблюдается увеличение поля смещения ДС и поля старта круговых линий Блоха. Блокированная структура разбивается на отдельные домены при определенной величине магнитного поля, приложенного вдоль оси трудного намагничивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panaetov V.P., Karabanova V.P., Popov V.I.* Influence of external magnetic field on the rapprochement and annihilation of domain boundaries in thin ferromagnetic films // ICMFS9 booklet. 1979. P. 254–256.
2. *Казаков В.Г., Панаэтов В.П., Бочкарев Б.Ф.* Взаимодействие периодических доменных границ в тонких железо-никелевых пленках // ФММ. 1982. Т. 53. Вып. 2. С. 407–408.
3. *Massenet O., Devenyi J.* Influence of magnetic field on domain structure in Fe–Ni films // C.R. Acad. Sci. 1967. V. 265. P. 605.
4. *Карабанова В.П., Антипьев Г.В.* Влияние внешнего магнитного поля на структуру границ с поперечными связями // Физика магнитных пленок, Иркутск. 1975. С. 126–130.
5. *Shwee L.J., Watson J.K.* A new model for cross-tie walls using parabolic coordinates // IEEE Trans. Mag. 1978. V. MAG-9. № 3. P. 551–554.
6. *Panaétov V.P.* Getting ferromagnetic metallic nanofilms for information recording on the magnetic moments of the electrons // J. Techn. Mater. 2015. V. 05. № 02. P. 20–23.
7. *Panaétov V.P.* Experimental investigation of the magnetic structure of domain walls in thin ferromagnetic films // Phys. Solid State. 2009. V. 51. № 10. P. 2064–2068.
8. *Петров В.И., Спивак Г.В., Павлюченко О.П.* Электронная микроскопия магнитной структуры тонких пленок // УФН. 1972. Т. 106. В. 62. С. 229–278.