

## Измерение подвижности доменных границ в аморфных лентах NiCoFeSiB с помощью Керр-микроскопии

С.В. Самченко,<sup>\*</sup> Н.Н. Перова,<sup>†</sup> Т.Б. Шапаева,<sup>‡</sup> Н.С. Перов<sup>§</sup>  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра магнетизма  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 24.07.2024)

Работа посвящена изучению с помощью Керр-микроскопии подвижности доменных границ в аморфной ленте NiCoFeSiB, полученной методом закалки из расплава. Измерения на магнитометре с вибрирующим образцом (вибрационном магнитометре) показали, что рассматриваемая аморфная лента характеризуется низким значением коэрцитивной силы (4.6 Э) и высоким значением намагниченности насыщения (80 ед. СГС/г). Магнитооптические свойства ленты были исследованы с использованием магнитооптического Керр-микроскопа. Установлено, что рассматриваемая аморфная лента обладает ярко выраженной равновесной доменной структурой, которая восстанавливается в отсутствие внешнего магнитного поля. Была исследована динамика доменных границ в низкочастотных магнитных полях (0.1, 0.5 и 1 Гц) малых амплитуд (до 12 Э). Были получены зависимости величин смещения доменных границ от времени для разных значений амплитуд и частот внешнего магнитного поля и рассчитаны зависимости скорости движения доменных границ от амплитуды поля. Подтверждена возможность определения скорости движения поверхностной доменной границы для различных участков исследуемой аморфной ленты. Описанный метод измерения подвижности доменных границ позволяет изучать динамические характеристики образцов при различных внешних условиях.

PACS:75.40.Gb, 75.60.Ch, 78.20.Ls УДК: 537.622

Ключевые слова: аморфные ленты, доменная структура, подвижность доменных границ, меридиональный эффект Керра.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день аморфные магнитные материалы находят широкое практическое применение в различных областях науки и техники [1]. Их физические свойства зависят от метода изготовления, обработки, геометрических размеров и других параметров.

Аттестацию изготовленных лент можно проводить различными методами в зависимости от поставленной задачи. Например, магнитные и магнитооптические методы широко используются для оценки намагниченности, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости [2–4]. Дополнительную информацию можно получить, изучая температурные зависимости различных параметров, а также электрические и механические свойства.

Магнитооптические эффекты позволяют изучать распределение намагниченности и динамику перемагничивания на поверхности образцов, причем в реальном времени [5, 6]. Особенности динамики доменов определяют важные функциональные свойства магнитных материалов для практического использования.

Первые данные о смещении доменных границ (ДГ) были получены при исследованиях перемагничивания

FeNi проволок индукционным методом [7, 8]. В этих работах было установлено, что скорость волны намагничивания (доменной границы) пропорциональна разности между приложенным полем  $H$  и некоторым критическим полем  $H_0$ , меньше которого граница не движется:

$$V = C(H - H_0). \quad (1)$$

Постоянная  $C$  впоследствии получила название подвижности доменной границы [9]. Подвижность доменной границы — это тангенс угла наклона начального линейного участка зависимости скорости движения границы от величины внешнего магнитного поля [10]. Это важная характеристика материала, которая определяет возможности его практического применения. Поскольку состав материала, условия изготовления и обработки влияют на поведение доменных границ, исследования их подвижности расширяют возможности характеристики образцов, позволяя выделять факторы, улучшающие динамические свойства материала. На сегодняшний день изучение динамики доменных границ и измерение их подвижности проводится в основном с помощью метода высокоскоростной фотографии [11]. В настоящей работе апробирован метод измерения подвижности доменных границ с помощью меридионального эффекта Керра.

### 1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В работе были исследованы аморфные ленты NiCoFeSiB, полученные методом закалки из распла-

\* samchenko.sv19@physics.msu.ru

† perova.n@physics.msu.ru

‡ shapaeva@mail.ru

§ perov@physics.msu.ru

ва. Для этого метода заметна разница морфологии поверхности между закалочной (остывающей на барабане) и свободной (застывающей на воздухе) сторонами ленты. Геометрические размеры ленты: толщина — 0.04 мм; ширина — 0.91 мм; длина — 5.19 мм. Состав аморфной ленты был изучен с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) Tescan Vega 3 и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Для визуализации деталей структуры поверхности использовали электроны при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для энергетической калибровки был использован детектор EDX Co. Чтобы свести к минимуму статистические ошибки, средний фазовый состав был получен по меньшей мере из сканирований восьми различных точек. Исследование показало, что основой аморфного сплава является Ni (41.1%) с добавлением Co (31.6%), Fe (7.7%) и аморфизирующих элементов Si (13.1%) и B (6.5%).

Объемные магнитные свойства изучаемых лент были исследованы на вибрационном магнитометре Lake Shore 7407 при комнатной температуре и в полях до 16 кЭ. Для первичной характеристики образца были проведены измерения в 2х геометриях: магнитное поле было направлено вдоль и перпендикулярно плоскости образца. В указанных полях намагниченность образца не выходит на насыщение при приложении поля перпендикулярно плоскости образца. Поэтому магнитооптические измерения проводили при ориентации поля в плоскости образца.

Изучение магнитооптических свойств и исследование динамики перемагничивания были проведены на Керр-микроскопе Evico magnetics GmbH, Германия, созданном на базе поляризационного микроскопа Carl Zeiss, в геометрии меридионального эффекта Керра при комнатной температуре. Изучаемая область имела размер  $300 \times 500 \text{ мкм}^2$ . Оптические исследования закалочной и свободной сторон ленты позволили установить, что закалочная сторона обладает большим количеством дефектов, из-за чего на ней не формируется равновесная доменная структура. Поэтому магнитооптические измерения проводили на свободной стороне ленты. Петли гистерезиса в полях до 400 Э были измерены в квазистатическом режиме изменения магнитного поля. Исследования динамики перемагничивания проводили в переменном магнитном поле малых амплитуд (от 4 до 12 Э) и низких частот (от 0.1 до 1 Гц).

Для изучения динамики перемагничивания доменных границ записывали видео с процессом перемагничивания при заданных значениях амплитуды и частоты внешнего поля. Запись проводилась высокочувствительной цифровой ССD-камерой с низким уровнем шума и частотой кадров в диапазоне 10–30 кадров/с. Для получения зависимостей смещения доменной границы от времени была произведена поккадровая обработка всех видео в программе с открытым кодом для обработки данных *Fiji*.

В работе [12] для теоретического описания движе-

ния доменных границ было использовано уравнение:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + kx = f \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $m$  — эффективная масса доменной границы, характеризующая её инерционные свойства,  $x$  — координата;  $\beta$  — параметр затухания;  $k$  — параметр, характеризующий упругость доменной границы;  $f = AH$  — сила, вызывающая движение доменной границы ( $A$  — нормировочный коэффициент);  $\omega$  — частота внешнего магнитного поля  $H$ .

Решением этого уравнения является следующая зависимость:

$$x = \frac{x_0}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \cdot e^{i(\omega t - \Phi)}, \quad (3)$$

где  $x_0$  — амплитуда отклонения от равновесного положения,  $\Phi$  — фаза отставания доменной границы от возбуждающего магнитного поля;  $\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m}}$  — резонансная частота;  $\omega_c = \sqrt{\frac{k}{\beta}}$  — собственная частота;  $t$  — время. В приближении низких частот ( $\omega \rightarrow 0$ ) максимальное смещение зависит от амплитуды магнитного поля линейно:

$$x_0 = \frac{AH}{k}. \quad (4)$$

Таким образом, аналитическое описание движения доменной границы под действием переменного синусоидального магнитного поля низкой частоты позволяет получить почти синусоидальную зависимость координаты доменной границы от времени для разных частот магнитного поля. При  $\omega \ll \omega_c$  и  $\omega \ll \omega_p$  смещение доменной границы пропорционально амплитуде переменного магнитного поля, а скорость движения ДГ — частоте переменного магнитного поля.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для подбора оптимальных условий измерений динамики доменной границы предлагаемым методом необходимо определить величину коэрцитивной силы образца. Значения коэрцитивной силы были определены из петель гистерезиса, полученных на вибрационном магнитометре и магнитооптической Керр-установке.

На рис. 1, а представлены полевые зависимости намагниченности, полученные при измерениях на вибрационном магнитометре. Установлено, что рассматриваемая аморфная лента характеризуется небольшой коэрцитивной силой (4.6 Э) и высоким значением намагниченности насыщения (80 ед. СГС/г), поэтому магнитооптические измерения проводили в малых полях.

Магнитооптический сигнал формируется на глубине порядка  $\lambda/4\alpha$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\alpha$  — коэффициент поглощения на этой волне [13]. Эта величина составляет в видимом свете не более 30 нм. Поэтому измерения, проведенные на магнитооптической

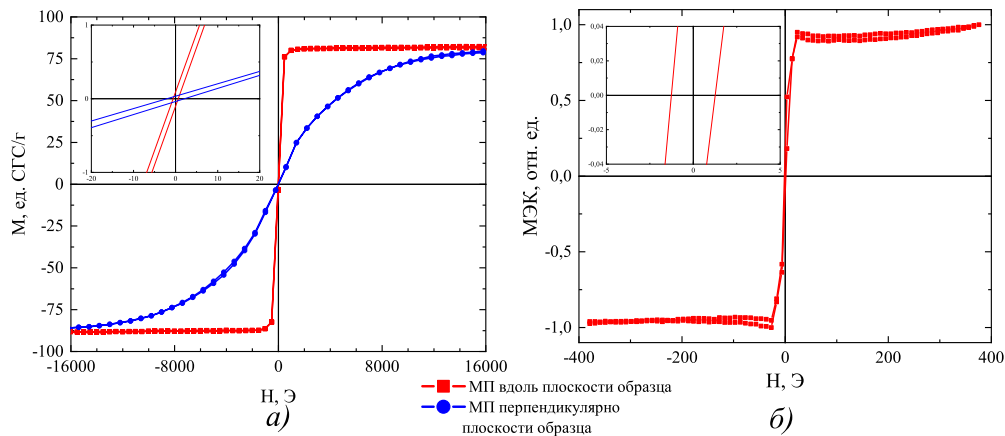


Рис. 1. Полевые зависимости намагниченности для аморфной ленты NiCoFeSiB, измеренные на вибрационном магнитометре (а) и на магнитооптическом Керр-микроскопе (б). Красные кривые получены при ориентации внешнего магнитного поля вдоль плоскости образца; синяя кривая — при ориентации поля перпендикулярно плоскости образца соответственно

установке, позволяют судить о процессах перемагничивания, происходящих в приповерхностном слое соответствующей толщины. На рис. 1, б представлена петля гистерезиса, полученная при измерении на магнитооптическом Керр-микроскопе в геометрии меридионального эффекта Керра. Уменьшение сигнала в полях насыщения объясняется дополнительным вкладом экваториального эффекта Керра. Установлено, что коэрцитивная сила на поверхности меньше, чем объёмная, и составляет 3.2 Э. Магнитооптические измерения показали, что лента обладает ярко выраженной доменной структурой, которая наблюдается при приложении как постоянного, так и переменного внешнего магнитного поля. Важно отметить, что в отсутствии внешнего магнитного поля равновесная доменная структура восстанавливается. Характерный вид доменной структуры представлен на рис. 2. Во внешнем магнитном поле происходит взаимное смещение границы между противоположно намагниченными доменами (тёмной и светлой (см. на рис. 2) областями) в зависимости от направления и величины поля.

Измерения смещения доменной границы проводили по 4 точкам, отмеченным на рис. 2, они соответствуют различным участкам границы. Исследования динамики перемагничивания были проведены в присутствии переменного магнитного поля малых амплитуд (4, 6, 8, 10 и 12 Э) и низких частот (0.1, 0.5 и 1 Гц). Для каждого значения амплитуды и частоты внешнего переменного магнитного поля было записано видео процесса перемагничивания, включающее несколько периодов перемагничивания. Затем была произведена кадровая обработка всех видео в программе с открытым кодом для обработки данных *Fiji*, в результате которой были получены зависимости мгновенного значения поля и смещения ДГ от времени. На рис. 3 представлены зависимости мгновенного значения поля (черная кривая, правая шкала) и смещения доменной границы

(цветные кривые, левая шкала) от времени при амплитуде внешнего поля 4 Э для двух значений частот: 0.1 и 1 Гц (рис. 3, а и 3, б соответственно). Динамика доменной границы в различных точках подобна. Однако из-за неравномерного распределения локальных дефектов на поверхности образца, смещение доменной границы в выбранных точках неодинаково. Для других величин амплитуд и частот магнитного поля зависимости смещения ДГ от времени имеют аналогичный вид.

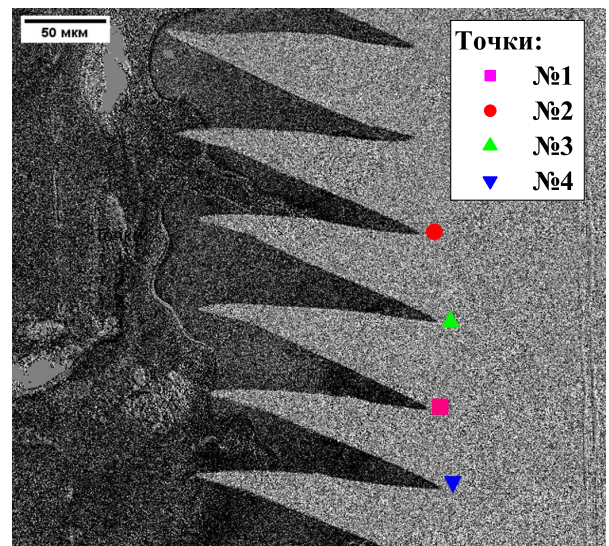


Рис. 2. Доменная структура аморфной ленты NiCoFeSiB. На рисунке отмечены 4 точки, для которых было проведено измерение смещения доменной границы. Точки соответствуют углам домена

Из полученных зависимостей смещения ДГ от времени были рассчитаны значения скорости движения доменной границы для каждой точки. Среднее значение этих величин соответствует скорости движения ДГ, а их отклонения от этого значения определяет по-

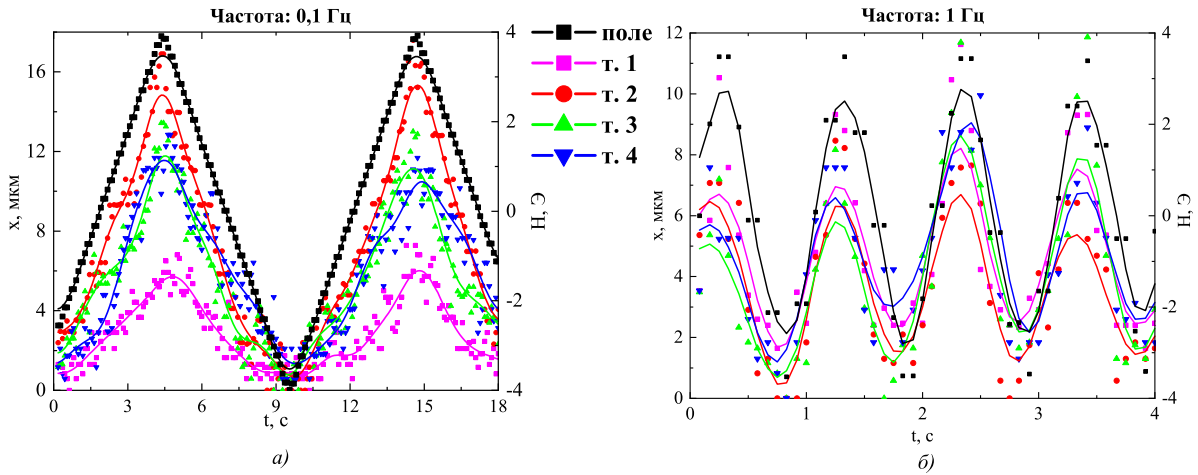


Рис. 3. Динамика доменных границ под действием переменного магнитного поля. Черная кривая показывает изменение величины поля  $H$  от времени. Цветные кривые показывают смещения точек  $x$ , отмеченных на рис. 2. Движение доменной границы происходит под действием магнитного поля с амплитудой 4 Э для двух значений частот: а — 0.1 Гц; б — 1 Гц

грешности (рис. 4). Для скорости движения ДГ получена линейная зависимость от амплитуды внешнего магнитного поля для разных частот, что согласуется с выражением (4).

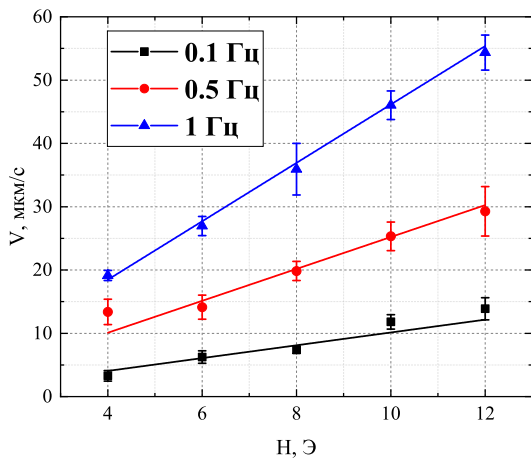


Рис. 4. Динамика доменных границ под действием переменного магнитного поля. Зависимости скорости движения доменных границ  $V$  от амплитуды внешнего магнитного поля, частота поля 0.1, 0.5 и 1 Гц — черная, красная и синяя кривые соответственно

Подвижность ДГ определена как тангенс угла наклона зависимости скорости движения ДГ от поля. При проведении измерений указанным методом скорость движения ДГ изменялась от 1.5 до 75 мкм/с, а подвижность ДГ для разных частот составляла от 1.01 мкм/(с·Э) до 4.61 мкм/(с·Э). Полученные значения подвижности доменной границы представлены в таблице. Погрешность определения скорости движе-

ния ДГ была не менее 12%, погрешность определения подвижности была не менее 15%.

Таблица. Подвижность доменных границ аморфной ленты при различных частотах

Частота, Гц	0.1	0.5	1
Подвижность, мкм/(с·Э)	1.0±0.1	2.5±0.4	4.6±0.7

Как показано в таблице, подвижность доменных границ возрастает с ростом частоты монотонно, но в отличие от выражений (3, 4) нелинейно. По-видимому, это связано с наличием локальных дефектов на поверхности образца, что приводит к нелинейности возрастания скорости и подвижности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы магнитные и магнитооптические свойства аморфной ленты NiCoFeSiB, полученной методом закалки из расплава. Апробирован метод измерения подвижности доменной границы с помощью меридионального эффекта Керра. Используемый метод измерения скорости движения доменных границ и определения подвижности хорошо подходит для исследования процессов перемагничивания при низких частотах в малых магнитных полях, что особенно важно для материалов с малой коэрцитивной силой. Полученные скорости движения ДГ и подвижности невелики, однако описанный метод позволяет сравнивать динамические характеристики образцов разных составов при различных внешних условиях, расширяя возможности использования Керр-микроскопа.

Авторы выражают благодарность Дмитрию Юрьевичу Карпенкову за проведенные исследования фазового состава аморфной ленты методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) Tescan Vega 3 и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX).

Работа поддержана грантом Министерства науки и образования РФ № 075-15-2021-1353 и выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

- 
- [1] *Wu-Xing Zhou, Yuan Cheng, Ke-Qiu Guofend Xie et al.* // *Advanced Functional Materials*. **30**. 1903829 (2020).  
 [2] *Yang Z., Golubeva E.V., Volchkov S.O., Shcherbinin S.V.* // *Inorganic Materials: Applied Research*. **11**, 849 (2020).  
 [3] *Mazaleyrat F.* // Springer Nature Switzerland AG. 1435 (2021).  
 [4] *Egbu J.* // *IEEE Transactions on Magnetics*. **59**, N 11, 1 (2023).  
 [5] *Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И.* Перспективные материалы и технологии. 251 (2019).  
 [6] *Шашков И.В., Кабанов Ю.П., Горнаков В.С.* Перспективные материалы и технологии. 140 (2023).  
 [7] *Sixtus K.J., Tonks L.* // *Phys. Rev.* **35**. 1441 (1930).  
 [8] *Sixtus K.J., Tonks L.* // *Phys. Rev.* **37**. 930 (1931).  
 [9] *Боков В.В., Боков В.А.* // *Физика твердого тела*. **50**, № 2. 193 (2008).  
 [10] *Шапаева Т.Б., Курбатова Ю.Н.* // *Краткие сообщения по физике*. № 8. 17 (2021).  
 [11] *Prabhakara K.H., Шапаева Т.Б., Юрлов В.В. и др.* // *Физика твердого тела*. **65**, № 2. 248 (2023).  
 [12] *Малоземов А., Слончевский Дж.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. Москва: Мир, 1982. С. 382.  
 [13] *Hubert A., Schöfer R.* *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1998.

## Measurement of the domain wall mobility in amorphous ribbons NiCoFeSiB using Kerr microscopy

S.V. Samchenko<sup>a</sup>, N.N. Perova<sup>b</sup>, T.B. Shapaeva<sup>c</sup>, N.S. Perov<sup>d</sup>

*Department of magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
 Moscow 119991, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>samchenko.sv19@physics.msu.ru, <sup>b</sup>perova.n@physics.msu.ru, <sup>c</sup>shapaeva@mail.ru, <sup>d</sup>perov@physics.msu.ru*

The work is devoted to the study of the domain wall mobility in an amorphous NiCoFeSiB ribbon obtained by melt quenching using Kerr microscopy. Measurements on a magnetometer with a vibrating sample (vibration magnetometer) showed that the amorphous ribbon in question is characterized by a low value of coercive force (4.6 Oe) and a high value of saturation magnetization (80 emu/g). The magneto-optical properties of the ribbon were investigated using a magneto-optical Kerr microscope. It is established that the considered amorphous ribbon has a pronounced equilibrium domain structure, which is preserved in the absence of an external magnetic field. The domain wall dynamics in low-frequency magnetic fields (0.1, 0.5 and 1 Hz) of small amplitudes (up to 12 Oe) was studied. The dependences of the domain wall displacement vs time for different values of the external magnetic field amplitudes and frequencies were obtained and the dependences of the domain wall velocity vs the field amplitude were calculated. The possibility to determine the surface domain wall velocity for various sections of the studied amorphous ribbon has been confirmed. The described method of measuring the domain wall mobility makes it possible to study the dynamic characteristics of samples under various external conditions.

PACS: 75.40.Gb, 75.60.Ch, 78.20.Ls

*Keywords:* amorphous ribbons, domain structure, domain wall dynamics, longitudinal magneto-optical Kerr effect.

*Received 10 June 2024.*

### Сведения об авторах

1. Самченко Серафима Викторовна — студент; e-mail: samchenko.sv19@physics.msu.ru.
2. Перова Наталья Николаевна — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-47, e-mail: perova.n@physics.msu.ru.
3. Шапаева Татьяна Борисовна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-18-47, e-mail: shapaeva@mail.ru.
4. Перов Николай Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-18-47, e-mail: perov@physics.msu.ru.