

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
**«Особенности микромагнитной структуры
быстрозакалённых сплавов»**

Работу выполнила:
студентка 219М группы
Самченко Серафима Викторовна

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор
Перов Николай Сергеевич

Зав. кафедрой магнетизма
д.ф.-м.н., профессор Перов Н.С.

Москва
2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Обзор литературы.....	8
1.1. Аморфные магнитные материалы	8
Структура аморфных материалов	8
Свойства аморфных материалов	10
1.2. Аморфные ленты.....	11
1.3. Классификация магнитооптических эффектов	12
1.4. Динамика движения доменных границ.....	15
Глава 2. Изучаемые образцы и методика эксперимента	17
2.1. Изучаемые образцы	17
Аморфные ленты с преобладанием Ni.....	17
Аморфные ленты с преобладанием Fe и Co.....	18
2.2. Методики эксперимента и оборудование	19
Магнитометр с вибрирующим образцом.....	19
Магнитооптический Керр-микроскоп.....	20
Спектральная магнитооптическая установка с широким температурным диапазоном	23
Глава 3. Результаты измерений и их обсуждение	25
3.1. Аморфные ленты на основе Ni.....	25
3.2. Аморфные ленты на основе Fe и Co	35
Основные результаты	40
Список литературы.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы, полученные методами быстрой закалки, находят широкое практическое применение в различных отраслях промышленности. Свойства таких сплавов определяются составом сплава, методом изготовления и обработки [1-2]. Поверхностные свойства контактной и свободной сторон быстрозакалённых лет отличаются, что объясняется разницей условий отвердевания на поверхностях [3].

В 1960 году А.И. Губанов предположил наличие магнитного упорядочения в аморфных сплавах [4]. На сегодняшний день аморфные магнитные ленты и микропровода продолжают находить новые практические применения благодаря уникальному сочетанию магнитных, механических и электрических свойств. В последние годы исследования сосредоточились на оптимизации характеристик аморфных материалов для использования в высокочувствительных датчиках, энергоэффективных устройствах, медицинских технологиях и «умных» материалах [5].

Аттестацию аморфных материалов можно проводить различными способами в зависимости от поставленной задачи. Для оценки основных магнитных характеристик (намагниченности насыщения, магнитной проницаемости, коэрцитивности) используются магнитные и магнитооптические измерения. Магнитооптические эффекты позволяют изучать распределение намагниченности на поверхности образцов, в том числе в реальном времени. Динамика перемангничивания материала определяет функциональные свойства аморфных магнитных материалов, что важно для их практического применения. На сегодняшний день исследования динамики перемангничивания направлены на выявление механизмов взаимодействия локальных атомных структур и динамики доменов.

Подвижность доменных границ – это характеристика, определяющая динамические свойства магнитных материалов. Динамические характеристики материала можно варьировать, изменяя состав материала, условия его изготовления и обработки. Изучение динамики доменных границ и измерение их

подвижности можно проводить с помощью метода Сикстуса-Тонкса (в проволоках) [36] или высокоскоростной фотографии (в прозрачных пленках) [6]. В настоящей работе приведены результаты исследования динамики доменных границ с помощью эффекта Керра. Первые результаты апробации метода были представлены автором на международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024» в статье «Измерение подвижности доменных границ аморфных лент с помощью эффекта Керра» [7]. На данный момент исследование расширено, проведена апробация метода на различных образцах. Полученные результаты и их обсуждение приведены в этой работе.

Объектом данного исследования стали аморфные ленты и микропровода, полученные методами быстрой закалки. В работе исследовалась 2 вида аморфных лент на основе Ni, Co, Fe. Также в состав рассматриваемых сплавов входили кремний, углерод и бор. Добавление этих элементов способствует улучшению механических характеристик аморфных сплавов, повышая их прочность. Кремний повышает температуру кристаллизации и улучшает стабильность магнитных свойств. При этом наиболее высокая магнитная проницаемость достигается при определенном соотношении кремния и бора. Углерод способствует образованию более однородной и стабильной аморфной фазы.

Целью данной работы является экспериментальное исследование микромагнитной структуры аморфных лент на основе Ni, Fe, Co и изучение динамики их перемагничивания.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Изучение магнитных и магнитооптических свойств рассматриваемых аморфных лент.
2. Получение спектральных и полевых зависимостей экваториального эффекта Керра для рассматриваемых образцов.
3. Сравнение магнитных и магнитооптических характеристик рассматриваемых образцов.

4. Изучение динамики перемангничивания аморфных лент в геометриях экваториального и меридионального эффектов Керра.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», секция Физика, 12-26 апреля 2024 года, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, «Измерение подвижности доменных границ аморфных лент с помощью эффекта Керра».
2. XXV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», 1-6 июля 2024 года, РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, «Изучение динамики доменных границ аморфных лент NiCoSiFeB с помощью меридионального эффекта Керра».
3. The 5th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA), 4-7 августа 2024 года, DONG HOI City, QUANG BINH Province, Vietnam, Вьетнам, «Effect of external influences on properties and magnetic microstructure of amorphous magnetic tapes».
4. Российская научно-техническая конференция с международным участием "Оптические технологии, материалы и системы» (ОПТОТЕХ-2024), 2-8 декабря 2024 года, РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, «Особенности перемангничивания быстрозакалённых лент NiCoSiFeB».
5. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2025», секция Физика, 11-25 апреля 2025 года, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, «Микромагнитная структура приповерхностного слоя быстрозакалённых аморфных сплавов системы Fe-Co-Ni-Si-B».
6. IcAUMS-2025 (International Conference of Asian Union of Magnetism Societies), 21-24 апреля 2025 года, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, «Magneto-optical and magnetic properties of rapidly quenched amorphous NiCoSiFeB ribbons».

Тезисы всех докладов были опубликованы в сборниках тезисов соответствующих конференций.

По результатам выступления на конференциях опубликованы статьи в сборниках:

1. Изучение динамики доменных границ аморфных лент NiCoSiFeB с помощью меридионального эффекта Керра, Сборник трудов XXV Международной конференции Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах (НМММ-2024), 2024 год.

2. Особенности перемагничивания быстрозакалённых лент NiCoSiFeB, Сборник трудов Российской научно-технической конференции с международным участием "Оптические технологии, материалы и системы» (ОПТОТЕХ-2024).

Опубликованы статьи в журналах:

1. Измерение подвижности доменных границ в аморфных лентах NiCoFeSiB с помощью Керр-микроскопии, Ученые записки физического факультета Московского Университета, 2024 г., №4, 2441701, с.1-5.

2. Зависимость магнитных и магнитоимпедансных свойств образцов аморфных сплавов на основе Fe от их формы. Влияние толщины стеклянной оболочки в случае микропроводов, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2024 г., №12.

Dependence of Magnetic and Magnetoimpedance Properties of Samples of Amorphous Fe-Based Alloys on Their Shape. Influence of Glass Shell Thickness in the Case of Microwires, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2024, Vol. 18, №6, p. 1545-1550. DOI: 10.1134/S1027451024701520

Актуальность работы связана с необходимостью изучения динамики перемагничивания аморфных лент при низких частотах в малых магнитных полях, что важно для использования материалов с малой коэрцитивной силой в практических приложениях.

Научная новизна работы состоит в том, что в работе впервые предложен метод измерения скорости доменных границ и определения подвижности при низких частотах в геометриях экваториального и меридионального эффектов Керра. Проведена апробация метода, показана его эффективность для исследования процессов перемангничивания при низких частотах в малых магнитных полях, что особенно важно для материалов с малой коэрцитивной силой. Описанный метод позволяет сравнивать подвижность доменных границ образца по различным направлениям намагничивания и изучать динамические характеристики образцов разных составов при различных внешних условиях.

Личный вклад автора

Автором были проведены исследования магнитных и магнитооптических свойств аморфных магнитных лент. Исследованы спектральные и полевые зависимости намагниченности, динамика движения доменных границ. Предложены и апробированы методы измерения скорости движения доменных границ и определения их подвижностей. Проведены измерения скоростей движения доменных границ и определены значения подвижностей доменных границ в различных направлениях перемангничивания.

Глава 1. Обзор литературы

1.1. Аморфные магнитные материалы

Среди многообразия быстрозакаленных сплавов особое место занимают аморфные магнитные материалы (АММ), которые представляют собой особый класс функциональных материалов с уникальным комплексом физических, химических и коррозионных свойств. Магнитномягкие аморфные материалы находят широкое практическое применение в различных областях, например, в трансформаторах для электроэнергетики, телекоммуникационном оборудовании и автомобильной электронике. Разработка сплавов с высокой намагниченностью насыщения и низкой коэрцитивной силой имеет большое значение для повышения мощности и эффективности современных электронных устройств [8]. С точки зрения развития теоретических знаний исследования аморфных материалов важны для углубления понимания механизмов формирования свойств аморфных материалов и изучения факторов, определяющих формирование доменной структуры и механизмов их перемангничивания.

Структура аморфных материалов

Характерная особенность аморфных магнитных материалов заключается в отсутствии дальнего порядка в расположении атомов, что принципиально отличает их от кристаллических аналогов. Аналогичная структура материала характерна для жидкостей, но в них происходит непрерывный обмен между соседними частицами, который затрудняется при увеличении их вязкости. Поэтому аморфное состояние можно рассматривать как переохлажденную жидкость с большей вязкостью. Благодаря этому АММ прочнее и более устойчивы к коррозии.

Как правило, аморфные материалы изготавливают методом быстрого охлаждения из расплава со скоростью охлаждения порядка 10^4 – 10^6 К/с, что способствует «заморозке» атомов в неупорядоченном состоянии [9, 10]. При экспериментальных исследованиях структуры АММ методом рентгеновской дифракции наблюдается характерное гало вместо чётких дифракционных пиков, что свидетельствует об отсутствии дальнего порядка в структуре [11].

Аморфные магнитные ленты, изучаемые в настоящей работе, были изготовлены методом быстрой закалки из расплава. На сегодняшний день этот метод остаётся основным методом получения аморфных магнитных лент. Для этого метода характерна разница морфологии поверхностей свободной (остывающей на воздухе) и закалочной (соприкасающейся с барабаном) сторон ленты. Характерный вид обеих сторон представлен на рисунке 1.

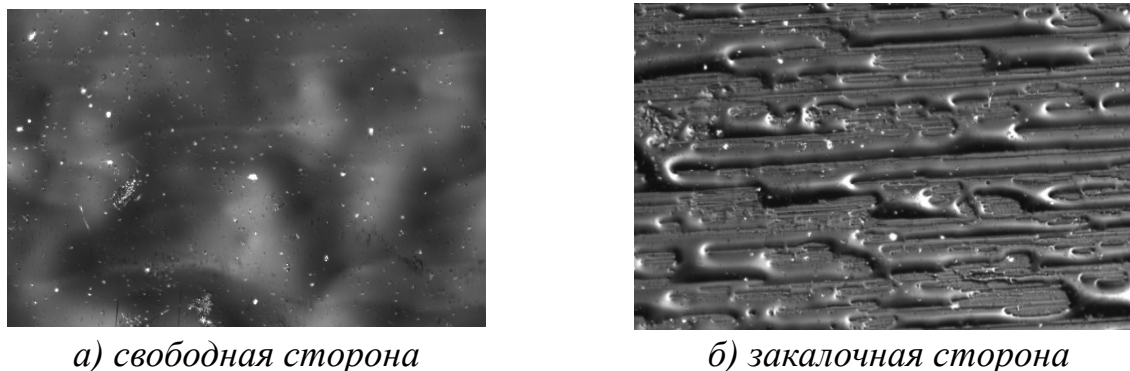


Рис. 1 Поверхности сторон аморфной ленты, изготовленной методом закалки из расплава

В случае сплавов с кристаллической структурой возникают сложности, связанные с антагонизмом свойств компонентов на этапе кристаллизации. В аморфных сплавах все компоненты соединяются. При сверхбыстром охлаждении сплав затвердевает, прежде чем начинается взаимодействие между компонентами-антагонистами. Это свойство открывает возможности поиска оптимальных комбинаций компонентов сплавов для получения необходимых свойств. На рис. 2 показаны аморфная (а) и кристаллическая (б) структуры/

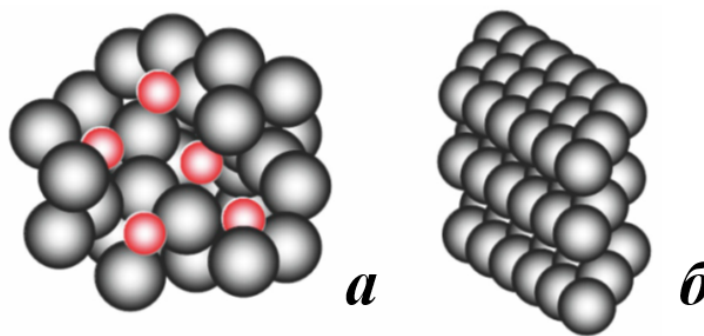


Рис. 2 Структуры: а) аморфная, б) кристаллическая

Свойства аморфных материалов

Структура аморфных материалов определяет уникальный комплекс физико-химических свойств, благодаря чему эти материалы незаменимы в современных технологиях.

Аморфные магнитные материалы обладают высокими прочностными характеристиками. Установлено, что предел их прочности в 2-3 раза выше, чем у кристаллических аналогов [12]. АММ отличаются высокой коррозионной стойкостью [13].

Особой интерес представляют магнитные свойства аморфных магнитных материалов, которые активно исследуются в последние годы. Ферромагнетизм аморфных сплавов обуславливается наличием в сплаве одного из элементов Fe, Ni, Co. Эти элементы представляют собой переходные металлы с незаполненной 3d-оболочкой. Электроны этой оболочки являются носителями локальных магнитных моментов. Спонтанная намагниченность объясняется существованием обменного взаимодействия между локальными магнитными моментами. При удалении локальных магнитных моментов друг от друга взаимодействие уменьшается, сплав становится парамагнитным.

Как правило, магнитномягкие аморфные сплавы на 70-80% состоят из одного или нескольких ферромагнитных металлов (Fe, Ni, Co) и на оставшиеся 20-30% из металлоидов (бор, кремний, углерод и др.). Бор и кремний, входящие в состав АММ, не дают материалу кристаллизироваться. Замена кремния на углерод повышает стеклообразующую способность материала. Молибден и хром могут способствовать увеличению критической толщины лент, однако избыток молибдена ухудшает магнитную мягкость. Таким образом, изменение состава материала позволяет изменять его физические свойства (температуру Кюри, удельное сопротивление, пластичность материала, намагниченность насыщения и др.), что позволяет подобрать наиболее оптимальный вариант для заданной задачи.

1.2. Аморфные ленты

С точки зрения практического применения особого внимания среди всех аморфных материалов заслуживают аморфные ленты. Аморфные ленты используются в электроэнергетике, автомобильной промышленности, аэрокосмической и оборонной отраслях и медицине. Так, ленты на основе железа применяются при изготовлении трансформаторов и зарядных станций для автомобилей. Аморфные ленты на основе кобальта находят применение, например, в высокочастотных градиентных катушках в оборудовании для МРТ [14], в магнитоимпедансных датчиках в качестве датчиков тока и медицинских биосенсоров для обнаружения опухолей [15]. Ленты на основе никеля используются для разработки беспроводных зарядных устройств, для защиты от электромагнитных помех, например, для экранирования бортовой электроники.

На сегодняшний день можно выделить несколько основных тенденций применения аморфных лент:

- 1) высокочастотные сенсоры [16];
- 2) ИИ-оптимизация: контроль доменной структуры для динамической подстройки параметров [17];
- 3) создание микроволновых патч-антенн [18].

Как правило, в промышленном производстве аморфные ленты изготавливаются охлаждением струи жидкого металла на поверхностях вращающихся барабанов или прокаткой расплава между холодными валками, изготовленными из материалов с высокой теплопроводностью. Изготовленные таким образом ленты могут быть неоднородными по составу, в связи с чем необходимы исследования однородности и распределения намагниченности на поверхности материалов. Помимо этого, они чувствительны к механическим воздействиям. Например, при помощи механического растяжения ленту можно довести до состояния, подобного магнитному насыщению, а после снятия нагрузки первоначальное магнитное состояние восстанавливается. В работе [19]

рассматривается вопрос о влиянии растягивающего механического напряжения на процесс намагничивания аморфных ферромагнитных сплавов.

В последние годы исследования аморфных лент сосредоточены на анализе динамики перемагничивания и доменной структуры. Особое внимание уделяется ультрабыстрым динамическим процессам, влиянию анизотропии, применению в высокочувствительных сенсорах, поверхностным эффектам [20].

1.3. Классификация магнитооптических эффектов

Магнитооптические исследования широко используются в научных исследованиях на сегодняшний день. С их помощью возможно наблюдение и описание различных эффектов. Например, в работе [21] описаны топологические магнитооптические эффекты, которые могут возникать в некомпланарных антиферромагнетиках из-за конечной скалярной спиновой хиральности, без какой-либо связи с расщеплением обмена или спин-орбитальным взаимодействием. Это открытие значительно расширяет теоретическое понимание природы магнитооптических эффектов.

Современные исследования демонстрируют ряд преимуществ магнитооптических эффектов для изучения магнитоупорядоченных материалов:

1. Высокая скорость и стабильность измерений: магнитооптические эффекты обеспечивают стабильный, сверхбыстрый и высокоразрешающий метод оптического контроля [22].
2. Бесконтактность и неразрушающий характер: методы не требуют прямого контакта с исследуемым образцом и не приводят к его изменению.
3. Высокая пространственная и временная разрешающая способность, что особенно важно при исследовании микромагнитной структуры быстрозакаленных сплавов [23].
4. Возможность изучения магнитных свойств: в зависимости от используемого эффекта можно исследовать различные магнитные характеристики.

5. Возможность наблюдения динамических процессов: методы позволяют изучать процессы перемагничивания и динамику доменных стенок в режиме реального времени.
6. Универсальность применения: методы подходят для исследования различных типов магнитных материалов, включая аморфные, кристаллические, нанокристаллические и композитные структуры.

Магнитооптические явления возникают из-за взаимодействия электромагнитного излучения с намагниченной средой, что приводит к изменению характеристик света. Они позволяют изучать микроструктуру и доменную организацию образцов, распределение намагниченности на поверхности образцов. Их классификация возможна по разным критериям.

- по методу наблюдения;
- по характеру распространения света относительно вектора намагниченности;
- по порядку проявления эффекта;
- по механизму возникновения.

Магнитооптический эффект Керра наблюдается в отраженном свете. При отражении линейно поляризованного света от поверхности намагниченного материала происходит поворот плоскости поляризации света, свет становится эллиптически поляризованным. Он был открыт шотландским физиком Джоном Керром в 1876 году.

В зависимости от взаимной ориентации векторов намагниченности, направления распространения света и нормали к поверхности различают три типа эффекта Керра.

1. **Полярный эффект Керра** (рис. 3а): вектор намагниченности $\vec{M}$ перпендикулярен к границе среды и параллелен плоскости падения света.
2. **Меридиональный эффект Керра** (рис. 3б): вектор намагниченности $\vec{M}$ параллелен плоскости падения света и поверхности раздела.

3. **Экваториальный эффект Керра** (рис. 3в): вектор намагниченности $\vec{M}$ параллелен поверхности раздела и перпендикулярен плоскости падения света. Экваториальный эффект Керра проявляется в изменении интенсивности и сдвиге фазы p -компоненты света, отраженного от ферромагнетика при его намагничивании. В отличие от полярного и меридионального эффектов, экваториальный эффект приводит не к изменению поляризации, а только к изменению интенсивности отраженного света.

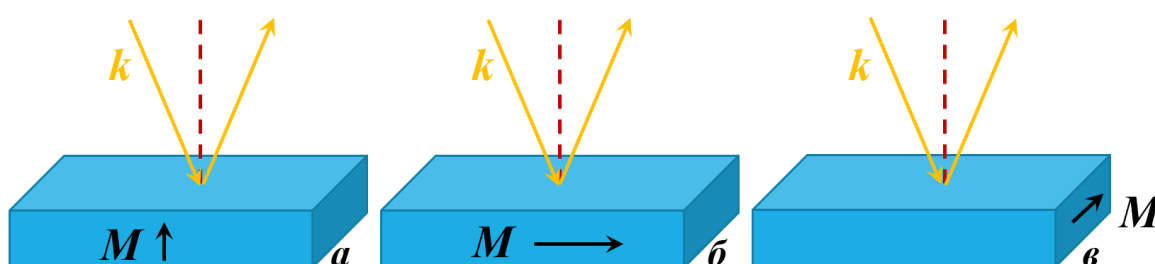


Рис. 3 Магнитооптический эффект Керра: а) полярный; б) меридиональный; в) экваториальный

Полярный и меридиональный эффекты Керра относятся к продольным магнитооптическим эффектам, так как в их случае вектор намагниченности лежит в плоскости падения света. А экваториальный эффект относится к поперечным, так как в его случае вектор намагниченности лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости падения света.

В зависимости от выбранной геометрии эффекта возможны исследования различных аспектов магнитной структуры материалов. Современные исследования направлены на расширение понимания фундаментальных механизмов магнитооптических эффектов. Они открывают новые перспективы их практического применения. В настоящей работе с помощью магнитооптических эффектов (экваториального и меридионального эффектов Керра) изучалась динамика движения доменных границ.

1.4. Динамика движения доменных границ

Методы магнитооптики позволяют изучать динамику доменных границ. Она связана с магнитными характеристиками материалов: коэрцитивной силой, магнитной проницаемостью [24]. Её оценка необходима при разработке спинтронных устройств, элементов высокочастотной электроники, энергоэффективных систем [25, 26].

Исследования динамики доменных границ позволяют получать значения подвижности доменных границ – ключевого параметра, характеризующего скорость доменных границ под действием внешних полей. Она определяется магнитными параметрами материала, микроструктурными факторами и внешними воздействиями.

Математическое описание динамики доменных границ в ферромагнетиках базируется на работах А.С. Малозёмова и Дж. Слончевского, которые заложили основы теории стационарного и нестационарного движения доменных стенок [27]. Современные исследования расширяют эти модели, сочетая их с экспериментальными методами магнитооптики.

Движение доменной границы под действием переменного магнитного поля с амплитудой H описывается следующим уравнением:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + kx = f \sin \omega t, \quad (1)$$

где m – эффективная масса ДГ; β – коэффициент потерь; k – коэффициент упругости ДГ; $f = AH$ – сила, вызывающая движение ДГ; ω – частота поля H .

Решением этого дифференциального уравнения является следующая зависимость:

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

где $\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – резонансная частота, $\omega_c = \sqrt{\frac{k}{\beta}}$ – релаксационная частота,

$\tan \Phi = \frac{\omega}{\omega_c \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2\right)}$ – сдвиг фазы между внешним магнитным полем и движением доменной границы.

Из уравнения (2) следует, что максимальное низкочастотное смещение имеет следующую зависимость:

$$x_o = \frac{AH}{k} \quad (3)$$

Оно прямо пропорционально амплитуде внешнего магнитного поля и не зависит от его частоты.

Определение подвижности доменных границ возможно из зависимостей скорости движения доменных границ от амплитуды внешнего магнитного поля. На сегодняшний день экспериментально достигаются рекордные скорости движения доменных границ. В работе [28] достигнута скорость 3 000 м/с в антиферромагнетике MnPS_3 . Методом двукратной высокоскоростной фотографии в аморфном сплаве GdFeCo при комнатной температуре наблюдалась скорость доменных границ 1,2 км/с [26].

В настоящей работе исследования динамики доменных границ проводились в низкочастотных магнитных полях (до 2 Гц). Низкочастотные поля позволяют изучать взаимодействие доменных границ с пиннинговыми центрами (дефекты, дислокации). Исследования в низкочастотных полях помогают снизить гистерезисные потери в трансформаторных сталях на 30% за счёт управления подвижностью доменных границ [29], позволяют объяснять аномалии пьезоэлектрического отклика, связанные с доменной релаксацией [30].

Таким образом, можно сделать вывод о важности исследований динамики доменных границ, в том числе в низкочастотных магнитных полях, как для углубления понимания механизмов формирования магнитных свойств материалов, так и для различных практических приложений.

Глава 2. Изучаемые образцы и методика эксперимента

2.1. Изучаемые образцы

В ходе выполнения магистерской диссертационной работы исследовались аморфные ленты различных составов, а именно, рассматривались 2 основные серии аморфных лент:

- 1) серия лент разного размера на основе Ni, на которых было проведено апробирование метода определения скорости и подвижности доменных границ на магнитооптическом Керр-микроскопе;
- 2) серия лент на основе Fe и Co, в которых варьировался состав лент. На этих образцах комплексно изучалась микромагнитная структура приповерхностного слоя, анализировалось влияние изменения состава образцов на их магнитооптические характеристики.

Аморфные ленты с преобладанием Ni

Аморфные ленты этой серии были получены методом закалки из расплава. Данная серия образцов состояла из 4-х лент разного размера, размерные характеристики образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики первой серии образцов

Образец	№1	№2	№3	№4
Длина, мм	5,19	2,85	1,25	0,59
Ширина, мм	0,91	0,90	0,91	0,92
Толщина, мм	0,04	0,04	0,04	0,04
Масса, мг	1,13	0,66	0,27	0,12

Исследование состава данной серии было проведено методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) Tescan Vega 3 и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) Карпенковым Дмитрием Юрьевичем. Для визуализации деталей структуры поверхности использовали электроны при ускоряющем напряжении 20кВ. 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. В результате проведенного анализа был получен элементный состав рассматриваемых лент, который представлен в таблице 2.

Таблица 2. Состав первой серии аморфных лент

Ni	Co	Si	Fe	B
41,1%	31,6%	13,1%	7,7%	6,5%

Аморфные ленты с преобладанием Fe и Co

Аморфные ленты этой серии были также получены методом быстрой закалки. Образцы были предоставлены Ражабовым Р.М. (Самаркандский государственный университет, Узбекистан).

Элементный состав серии образцов был изучен методом рентгеноспектрального анализа (EDX), морфологический анализ расположения атомов – методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), структурное состояние образцов – методом рентгеновской дифракционной спектроскопии. Составы и массы исследуемых образцов приведены в таблице 3.

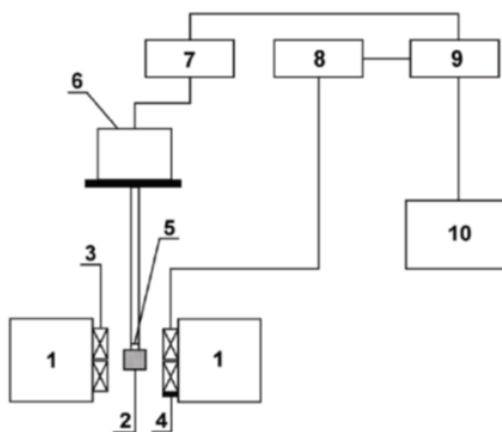
Таблица 3. Составы и массы второй серии лент

№	Состав	Масса, г
1	Fe _{83,9} Co _{2,3} Ni _{6,7} Si _{7,1}	0,0051
2	Fe _{5,1} Co _{91,3} Si _{3,6}	0,0055
3	Fe _{68,5} Ni _{19,1} Si _{4,9} C _{7,5}	0,0055
4	Fe _{81,7} Ni _{10,6} Si _{7,7}	0,0061
5	Fe _{86,6} Ni _{9,6} Si _{3,8}	0,0048
6	Fe _{67,3} Ni _{18,2} Si _{5,1} C _{9,4}	0,0078
7	Fe _{71,6} Ni _{18,7} Si ₅ C _{4,7}	0,0077
8	Fe _{70,5} Ni _{18,3} Si ₅ C _{6,2}	0,0082

2.2. Методики эксперимента и оборудование

Магнитометр с вибрирующим образцом

Первичные магнитные свойства изучаемых образцов, а именно намагниченность насыщения M_S , поле насыщения H_S и коэрцитивная сила H_C , определялись с помощью магнитометра с вибрирующим образцом (далее – вибрационный магнитометр).



- | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1. Электромагнит | 6. Вибратор |
| 2. Образец | 7. Генератор низкочастотных колебаний |
| 3. Приемные катушки | 8. Усилитель |
| 4. Датчик Холла | 9. Синхронный детектор |
| 5. Держатель образца (шток) | 10. Персональный компьютер |

Рис. 4 Блок-схема вибрационного магнитометра

Исследования на вибрационном магнитометре, как правило, проводятся в однородных магнитных полях, создаваемых электромагнитом или соленоидом. Блок-схема вибрационного магнитометра представлена на рисунке 4 [31]. Образец, закрепленный на штоке, совершает гармонические колебания, создаваемые вибратором, на который подается напряжение от генератора низкочастотных колебаний. Переменный сигнал, амплитуда которого пропорциональна магнитному моменту исследуемого образца, усиливается селективным усилителем, величина амплитуды определяется с помощью синхронного детектора. Полученный сигнал оцифровывается и передается на

компьютер. Для измерения величины магнитного поля используется датчик Холла. В случае проведения измерений в диапазоне температур подключается термопара. Магнитный момент M исследуемого образца определяется путём его сравнения с эталонным образцом.

Основные параметры вибрационного магнитометра:

1. Максимальная величина магнитного поля при комнатной температуре – 23 кЭ;
2. Максимальная величина магнитного поля в диапазоне температур от 4.2 до 1300 К – 16 кЭ;
3. Максимальная чувствительность – $1-2 \cdot 10^{-7}$ Гс*см³;
4. Дискретность изменения величины магнитного поля – 0,1 Э;
5. Точность изменения величины магнитного поля – 0,1 Э.

Магнитооптический Керр-микроскоп

Важную роль в формировании магнитных характеристик аморфных материалов играет их поверхность. Одним из методов исследования свойств приповерхностного слоя магнитных материалов является магнитооптический метод, основанный на эффектах Керра. Магнитооптические методы используются при наблюдении поверхностных доменных структур и их изменений под различными внешними воздействиями.

Исследование магнитооптических характеристик образцов и наблюдения доменной структуры изучаемых образцов в настоящей работе проводилось с помощью магнитооптической установки Evico magnetics «Керр-микроскоп-магнетометр» (рис. 5) [32].

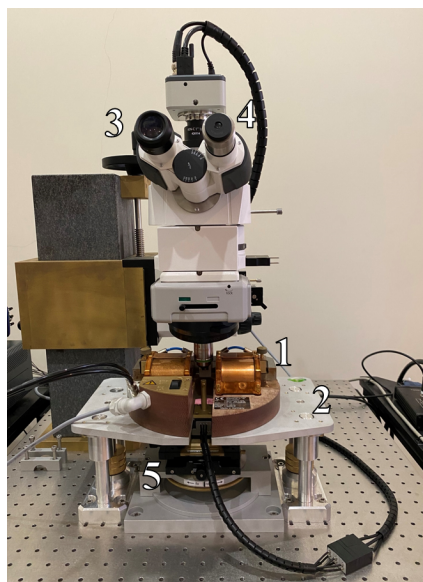


Рис. 5 Магнитооптическая установка «Керр-микроскоп-магнетометр»

- | | |
|--|----------------------|
| 1. Электромагнит | 4. Камера |
| 2. Держатель магнита | 5. Поворотный столик |
| 3. Оптический микроскоп с
высоким разрешением | |

Магнитооптический Керр-микроскоп позволяет проводить измерения петель гистерезиса и одновременно регистрировать изменения компоненты намагниченности, M , под действием внешнего магнитного поля, то есть, визуализировать изменения доменной структуры в процессе перемагничивания образцов.

Основные технические характеристики установки [32]:

1. Линейные размеры области наблюдения: 0,1–5,0 мм;
2. Размер области наблюдения дополнительного обзорного поляризационного микроскопа: 8,0–30,0 мм;
3. Источник света: 8 высокостабильных светодиодов, длина волны 450 нм;
4. Цифровая фотокамера с разрешением 1344×1024 пкс.

В данной работе измерения на магнитооптическом Керр-микроскопе были выполнены при комнатной температуре. Использовалась геометрия меридионального и экваториального эффектов Керра. Измерения проводились в полях до 400 Э в режиме приложения постоянного магнитного поля (для

получения петель гистерезиса в приповерхностном слое) и в режиме переменного магнитного поля (для изучения динамики перемагничивания).

Отметим, что изучаемые в работе области везде имели размер 500×300 мкм². Все изображения, которые будут приведены в этой работе имеют указанный размер.

Для визуализации доменной структуры в процессе перемагничивания образца используется техника разностного изображения, которая заключается в вычитании фонового изображения однородно намагниченного образца (полученное в постоянном или переменном магнитном поле) из исходного «живого» изображения, содержащего информацию о доменной структуре. Процедура показана на рис. 6:

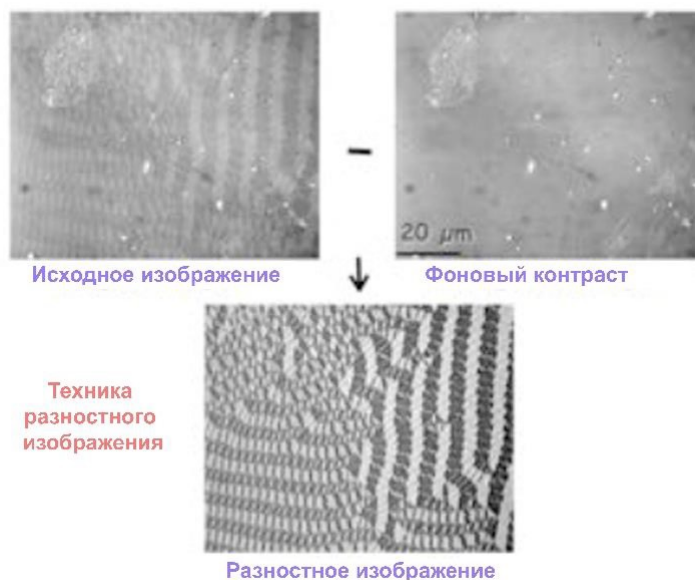


Рис. 6 Техника разностного изображения

В случае аморфных лент разностные изображения могут содержать топографические контрасты, так как поверхность ленты негладкая, то общая разность интенсивности отраженного света при насыщении в противоположных ориентациях магнитного поля кажется неоднородной. Эта особенность была изучена на серии аморфных лент на основе Fe. Для характеристики процессов перемагничивания в приповерхностном слое в этих образцах проводились магнитооптические измерения на различных участках ленты, определяя как

суммарный отклик системы размера 500×300 мкм, так и от меньших участков системы.

Спектральная магнитооптическая установка с широким температурным диапазоном

Измерения спектров ЭЭК проводились на спектральной магнитооптической установке динамическим методом, особенностью которого является применение переменного магнитного поля для намагничивания образца. Благодаря применению переменного поля можно одновременно измерить интенсивность света, отраженного от намагниченного и ненамагниченного образца, методом синхронного детектирования. Спектральные магнитооптические установки позволяют проводить измерения в широком диапазоне длин волн (обычно от 400 до 1000 нм), что особенно важно для изучения аморфных систем, где спектральные особенности часто не выражены в виде резонансов, но могут проявляться через различия в уровне сигнала и его знаке [33-34].

Схема установки представлена на рисунке 7.

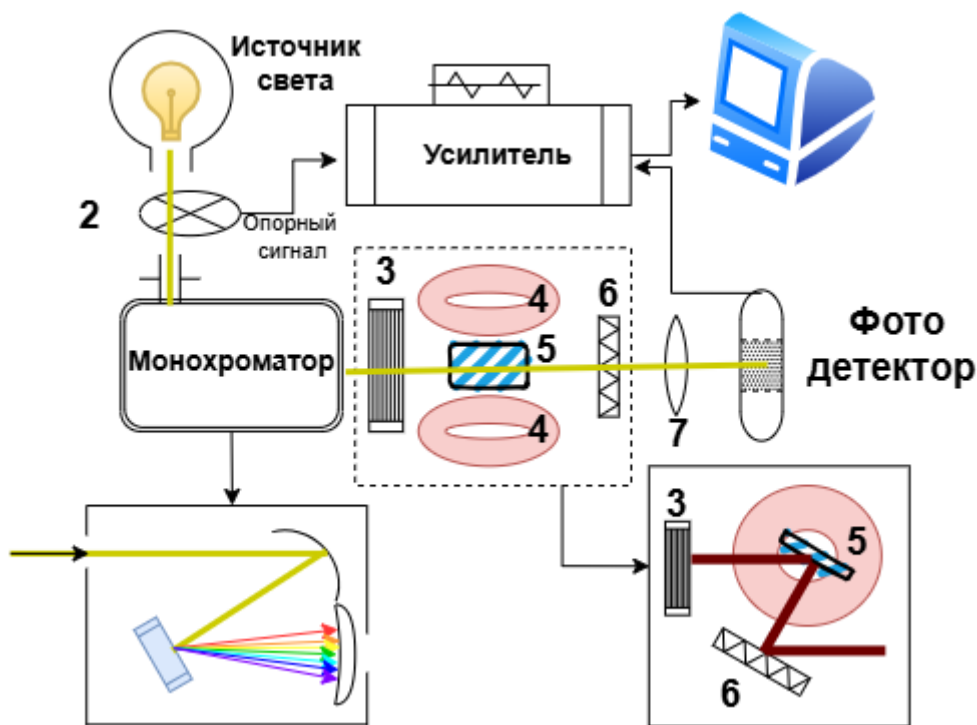


Рис. 7 Спектральная магнитооптическая установка с широким температурным диапазоном

- | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|
| 1. Источник света | 4. Электромагнитн | 6. Анализатор |
| 2. Прерыватель | ые катушки | 7. Линза |
| 3. Поляризатор | 5. Держатель | 8. Зеркало |
| | образца | |

Свет от источника попадает во входную щель, размер щели определяет количество света, которое может быть измерено прибором. После прохождения через щель луч попадает на дифракционную решетку. Решетка действует как рассеивающий элемент и разделяет свет на составляющие его длины волн. Изменение угла дает выходной пучок конкретной длины волны. Поворот барабана на монохроматоре фиксируется через ЦАП и передается в программу для контроля длины волны. После прохождения поляризатора свет становится линейно поляризованным. Он отражается от поверхности исследуемого образца, который находится между полюсами электромагнита. Для перенаправления отраженного света используются зеркало и собирающая линза.

Изменение интенсивности отраженного от образца поляризованного света регистрируется фотодетектором. В зависимости от исследуемого диапазона длин волн – подключается либо фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), чувствительный в диапазоне от 420 до 630 нм, либо фотоприёмное устройство с фотосопротивлением PbS, работающее в диапазоне 620-720 нм. Спектральные зависимости снимаются сначала в диапазоне от 420 до 630 нм, потом после замены фотодетектора снимается диапазон 620-720 нм. При измерении каждой точки идет временная и статистическая стабилизация значения сигнала. В интервале от 620 до 630 нм фиксируются как минимум 3 точки на каждом детекторе для минимизации ошибки при совмещении спектров.

Выходным сигналом от усилителя является амплитуда частотной составляющей и фазовый сдвиг относительно опорного сигнала, ЭЭК измеряется в условных единицах и является безразмерной величиной.

Глава 3. Результаты измерений и их обсуждение

3.1. Аморфные ленты на основе Ni

Первичная характеристика аморфных лент проводилась на вибрационном магнитометре. Образцы из первой серии измерялись в 2 положениях для определения значения коэрцитивной силы по осям лёгкого и трудного намагничивания. Для этого магнитное поле прикладывалось вдоль и перпендикулярно оси прокатки образца (рис. 8).

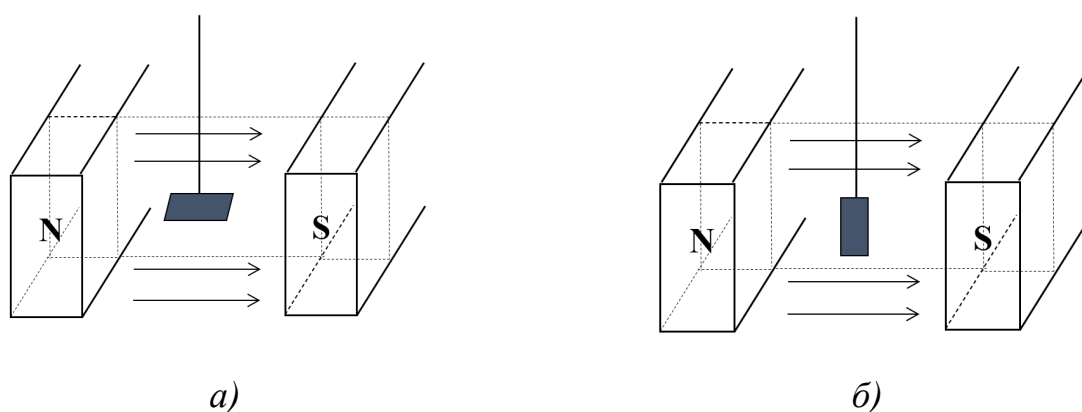


Рис. 8 Геометрия эксперимента на вибрационном магнитометре:

а) магнитное поле вдоль оси прокатки образца;

б) магнитное поле перпендикулярно оси прокатки образца.

Измерения петель гистерезиса были проведены в полях от -16 кЭ до 16 кЭ при комнатной температуре. Установлено, что, рассматривая аморфная лента характеризуется низким значением коэрцитивной силы и высоким значением намагниченности насыщения. Помимо этого, установлено, что ось лёгкого намагничивания соответствует оси прокатки образца (рис. 9).

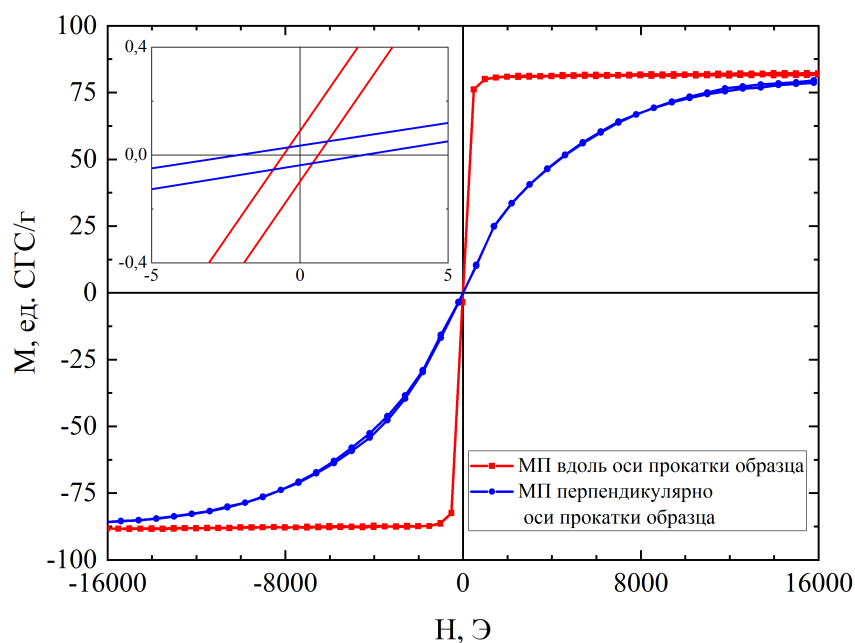


Рис. 9 Магнитопольные зависимости для аморфной ленты $NiCoFeSiB$

Из полученных зависимостей были определены значения коэрцитивной силы по каждому из направлений, они приведены в таблице 4.

Таблица 4. Объёмная коэрцитивная сила аморфной ленты $NiCoFeSiB$

Геометрия	Коэрцитивная сила, Э
Магнитное поле вдоль оси прокатки образца	0,4
Магнитное поле перпендикулярно оси прокатки образца	4,6

Полученные значения коэрцитивной силы были использованы для дальнейших магнитооптических исследований. После исследования объёмных магнитных свойств были получены спектральные зависимости ЭЭЖ для рассматриваемого образца (рис. 10).

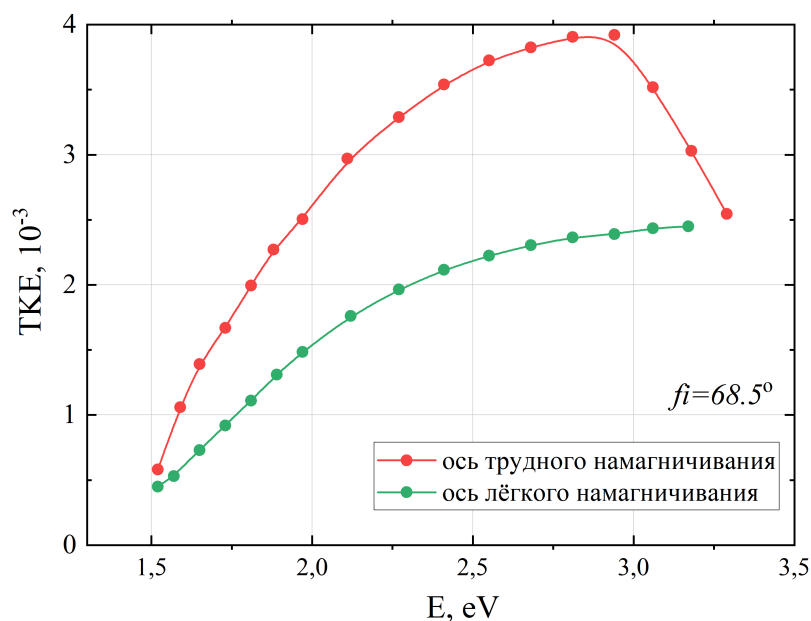


Рис. 10 Спектральные зависимости для образца NiCoFeSiB в 2 геометриях

Полученный вид спектральных зависимостей характерен для аморфных образцов, в нём отсутствуют особенности, наблюдаемые при наличии нанокристаллических включений.

Затем были проведены измерения петель гистерезиса в приповерхностном слое на магнитооптической установке «Керр-микроскоп-магнитометр». Были исследованы все 4 образца рассматриваемой серии в геометрии меридионального эффекта Керра в полях от -400 до 400 Э при комнатной температуре.

Эти измерения были необходимы для анализа влияния анизотропии формы на доменную структуру лент. Полученные петли гистерезиса и соответствующие каждой ленте доменные структуры представлены на рисунке 11.

Установлено, что данные образцы обладают ярко выраженной доменной структурой, причем равновесная доменная структура (в отсутствие магнитного поля) воспроизводится. При уменьшении размеров образца до некоторой величины размеры доменов увеличиваются, затем происходит объединение доменов меньшего размера в домен большего размера. Это объясняется вкладом анизотропии формы, а также краевыми эффектами, из-за которых образцу оказывается более энергетически выгодно разбиение на домены больших

размеров. Дополнительные пики на петле гистерезиса, наблюдаемые при измерении меридионального эффекта Керра в образце №1, можно объяснить вкладом ЭЭК. Изменение размеров образца влияет на процесс перемагничивания.

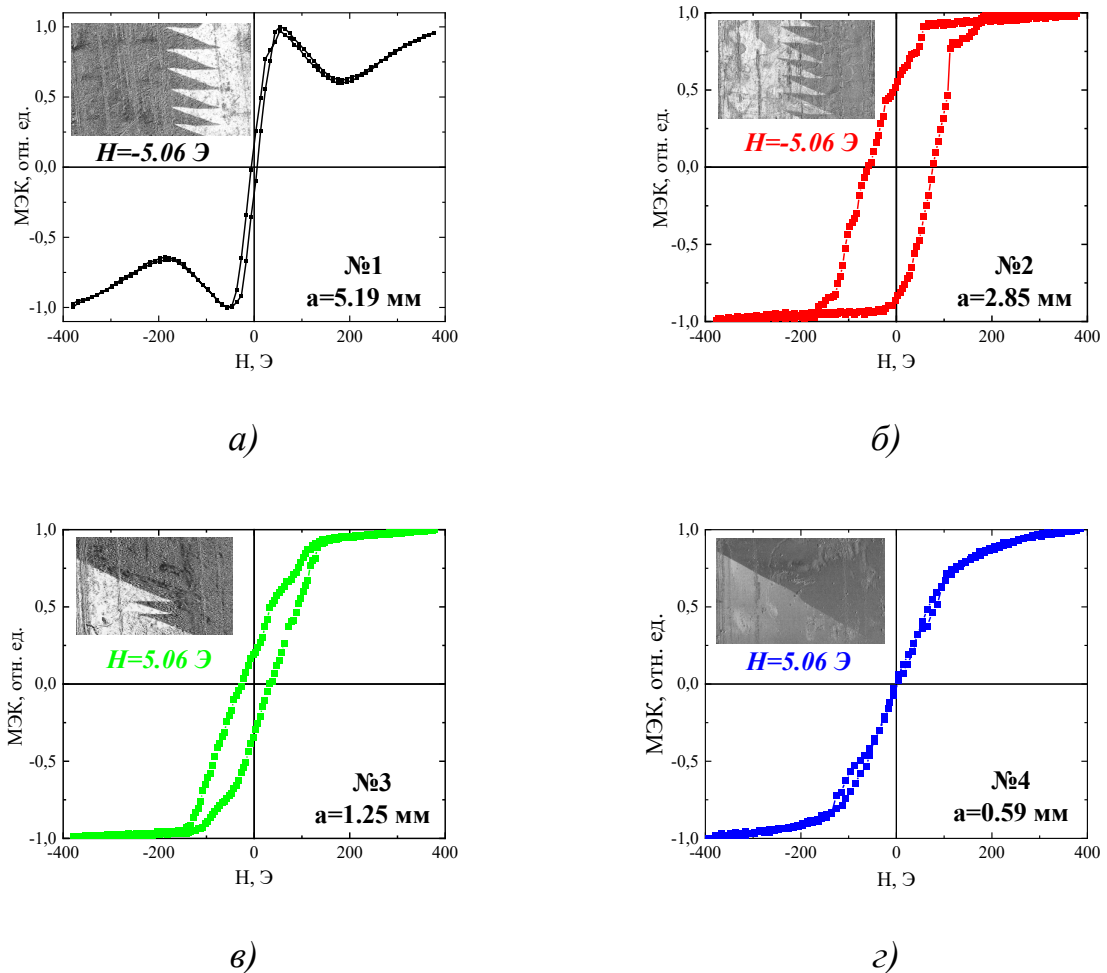


Рис. 11 Магнитооптические зависимости МЭК для первой серии образцов

Для изучения динамики доменных границ был выбран образец №1. Для подбора необходимых параметров для изучения динамики доменных границ на образце №1 были измерены петли гистерезиса в геометрии экваториального эффекта Керра (рис. 12б) по осям лёгкого и трудного намагничивания. Полученные зависимости представлены на рисунке 12.

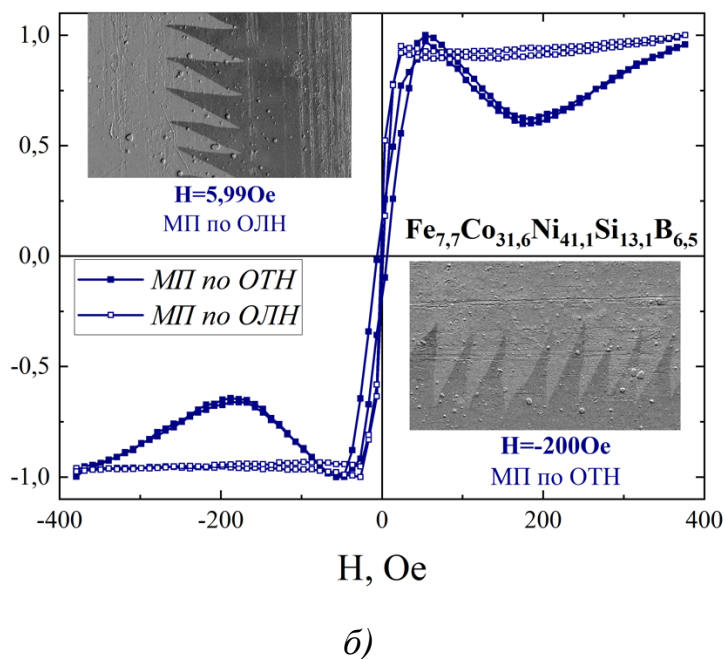
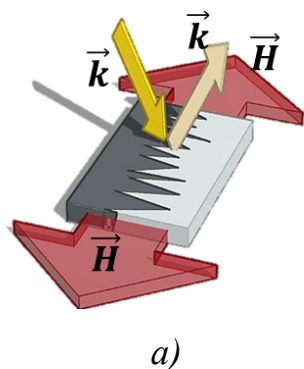


Рис. 12 Магнитопольевые зависимости, полученные в геометрии экваториального эффекта Керра (а), в случае приложения магнитного поля по осям лёгкого и трудного намагничивания (б)

Полученные петли гистерезиса в обеих геометриях характеризуются низкими значениями коэрцитивной силы. В случае приложения магнитного поля вдоль оси прокатки образца коэрцитивная сила меньше, чем в случае приложения магнитного поля по оси трудного намагничивания, как и в случае объёмных магнитных измерений. Полученные значения представлены в таблице 5.

Таблица 5. Коэрцитивная сила в приповерхностном слое аморфной ленты *NiCoFeSiB*

Геометрия	Коэрцитивная сила, Э
Магнитное поле вдоль оси прокатки образца	0,5
Магнитное поле перпендикулярно оси прокатки образца	3,2

Эти значения определили значения амплитуд переменных магнитных полей, при которых были проведены исследования динамики доменных границ. В таблице 6 представлены параметры проведения этих исследований.

Таблица 6. Условия проведения исследований динамики доменных границ в аморфной ленте NiCoFeSiB

Геометрия	Ось трудного намагничивания	Ось лёгкого намагничивания
Магнитооптический эффект	Экваториальный эффект Керра	
Температура	Комнатная	
Частота переменного поля, Гц	0,1; 0,5; 1	
Амплитуда поля, Э	4; 6; 8; 10; 12	0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2

Для обеих рассматриваемых геометрий при каждом значении были проведены измерения смещения 4 точек, различным участкам доменной структуры (рис. 13).

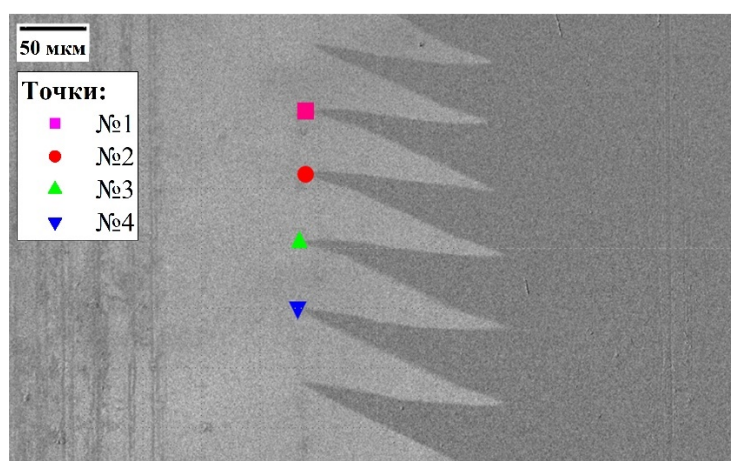


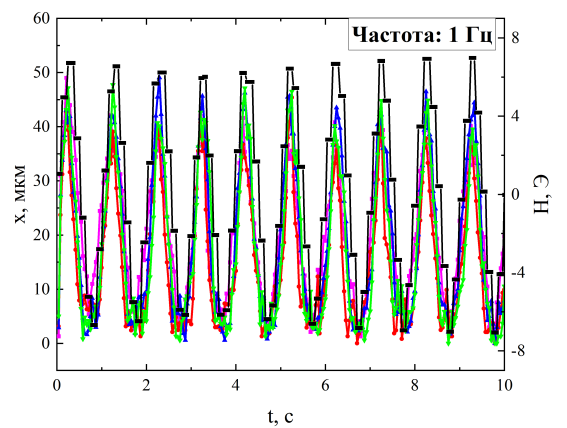
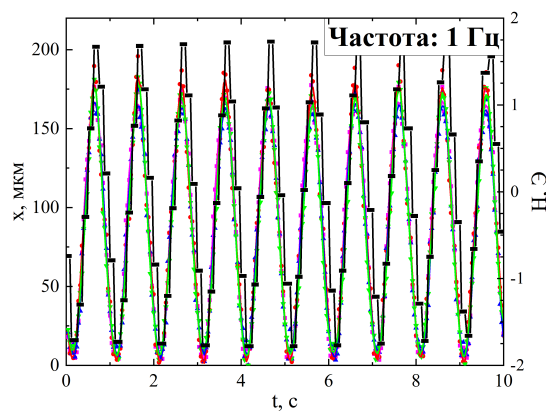
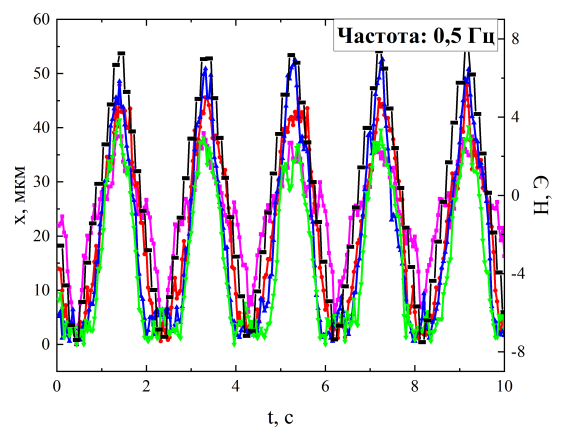
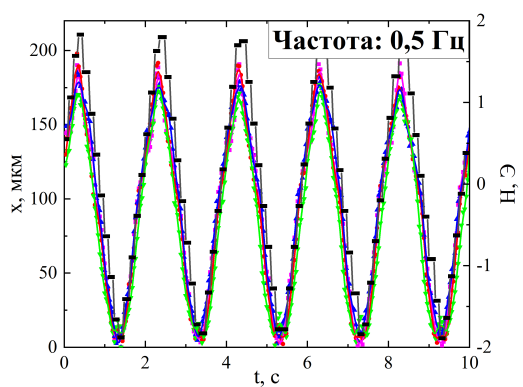
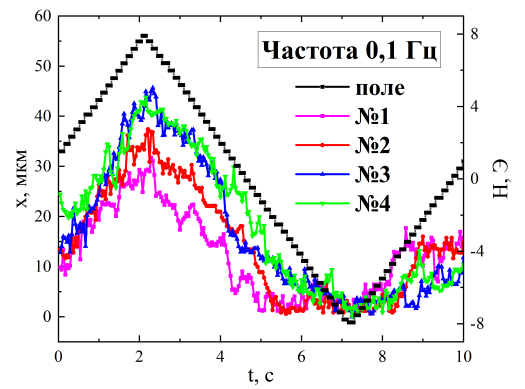
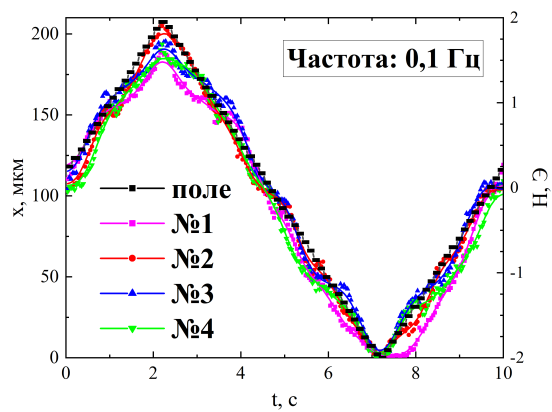
Рис. 13 Доменная структура аморфной ленты NiCoFeSiB. На рисунке отмечены точки, для которых было проведено измерение смещения доменной границы. Точки соответствуют углам доменной границы

Перемагничивание образца происходило при приложении переменного магнитного поля. Записывались видео с процессом перемагничивания образца. Установка «Керр-микроскоп-магнитометр» позволяет одновременно с приложением магнитного поля получать визуализацию доменной структуры. Затем была проведена покадровая обработка видео процесса перемагничивания, в процессе которой определялось положение рассматриваемых точек в каждый момент. Характерный вид кривых представлен на рисунке 14. На каждом графике левая ось соответствует значению смещения доменной границы, правая ось – соответствующее значение переменного внешнего магнитного поля, а горизонтальная ось показывает время с начала проведения эксперимента.

Отметим, что для всех случаев наблюдалось смещение точек происходило синхронно с внешним магнитным полем. Помимо этого, в случае перемагничивания по оси трудного намагничивания наблюдается большее расхождение амплитуд смещения точек, чем в случае перемагничивания по оси лёгкого намагничивания, что объясняется геометрией эксперимента и вкладами дефектов, которые играют большую роль при перемагничивании по оси трудного намагничивания.

Путём усреднения значений смещения каждой из точек были получены зависимости максимального смещения доменных границ x_0 от амплитуды внешнего магнитного поля. Они представлены на рисунке 15. Отметим, что в случае перемагничивания по оси лёгкого намагничивания погрешность максимального смещения доменной границы составила 5%, в случае перемагничивания по оси трудного намагничивания – 15%.

Установлено, что максимальное смещение ДГ не зависит от частоты внешнего магнитного поля и линейно зависит от его амплитуды. Полученные результаты совпадают с теоретической моделью [27], что говорит о справедливости предложенного метода.



а)

б)

Рис. 14 Зависимости смещения рассматриваемых точек от времени при частотах 0,1; 0,5 и 1 Гц при приложении МП по оси лёгкого намагничивания при амплитуде поля 2 Э (а) и при приложении МП по оси трудного намагничивания при амплитуде поля 8 Э (б)

Затем из полученных зависимостей смещений доменных границ были получены значения максимальной скорости доменных границ для обеих геометрий эксперимента как тангенсы угла наклона зависимостей смещения доменных границ от времени. Они представлены на рисунке 15.

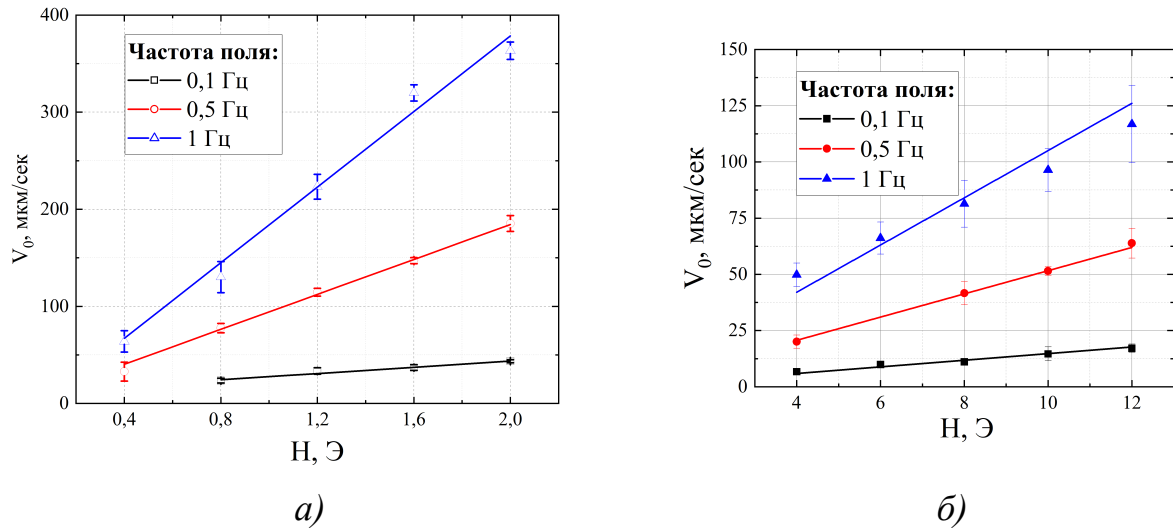


Рис. 15 Зависимости максимальной скорости движения доменных границ от амплитуды внешнего магнитного поля при приложении поля по осям лёгкого (а) и трудного (б) намагничивания

Из этих зависимостей как тангенс угла наклона были получены значения подвижностей доменных границ для обеих геометрий при трёх рассматриваемых значениях частот внешнего магнитного поля (таблица 7). Полученные результаты демонстрируют, что в случае перемангничивания образца по оси легкого намагничивания подвижность его доменных границ примерно в 15 раз больше, чем при перемангничивании по оси трудного намагничивания.

Таблица 7. Подвижности доменных границ в аморфной ленте NiCoFeSiB, мкм/(с×Э)

Частота, Гц	0,1	0,5	1
Ось лёгкого намагничивания	22,7±1,2	93,0±1,0	188,0±5,0
Ось трудного намагничивания	1,5±0,1	5,2±0,4	10,5±0,5

Данные результаты соответствуют теоретическим представлениям о движении доменных границ при низких частотах внешнего переменного поля. Все зависимости линейны, подвижность ДГ линейно возрастает с ростом частоты. Точность определения скорости движения ДГ не превышала 15%, точность определения подвижности не превышала 6%. Результаты соответствуют теоретическим представлениям о движении доменных границ при низких частотах внешнего переменного поля [27].

Используемый метод измерения скорости движения доменных границ и определения подвижности подходит для исследования процессов перемещения при низких частотах в малых магнитных полях, что особенно важно для материалов с малой коэрцитивной силой. Описанный метод позволяет изучать динамические характеристики образцов разных составов при различных внешних условиях.

3.2. Аморфные ленты на основе Fe и Co

Аналогично исследованиям первой серии образцов первичная характеристика второй серии (состав образцов представлен в таблице 3) была проведена на вибрационном магнитометре для определения основных магнитных параметров. Вторая серия образцов полностью перемагничивалась при меньших полях, поэтому петли гистерезиса для них были сняты в полях от $-1\,500$ до $1\,500$ Э при комнатной температуре. Результаты измерений объёмных магнитных свойств этой серии образцов представлены на рисунке 16.

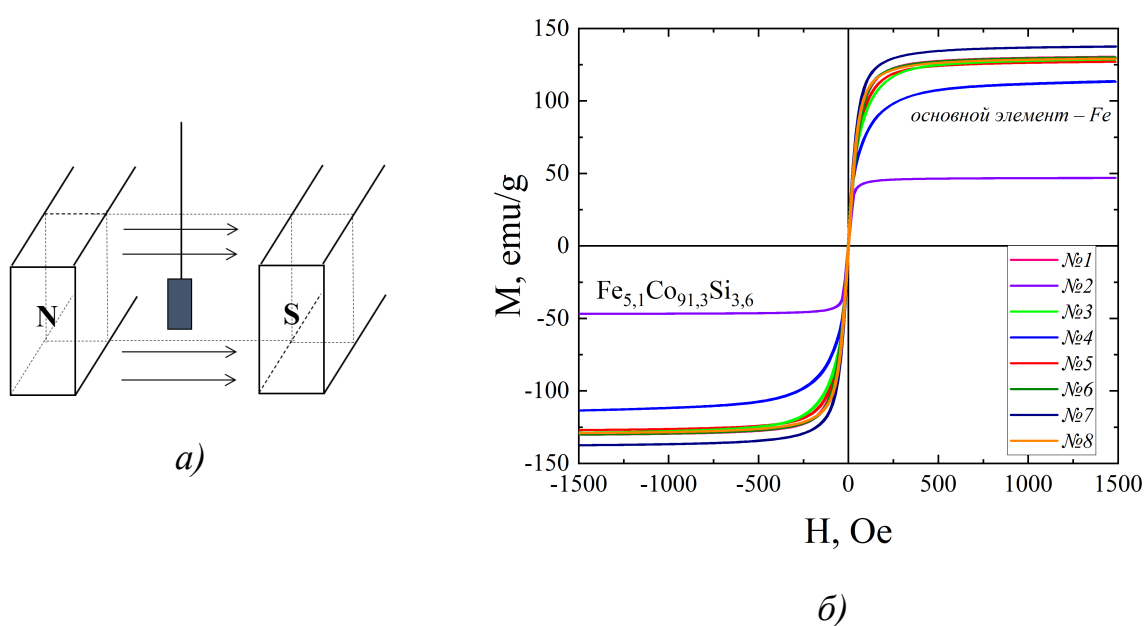


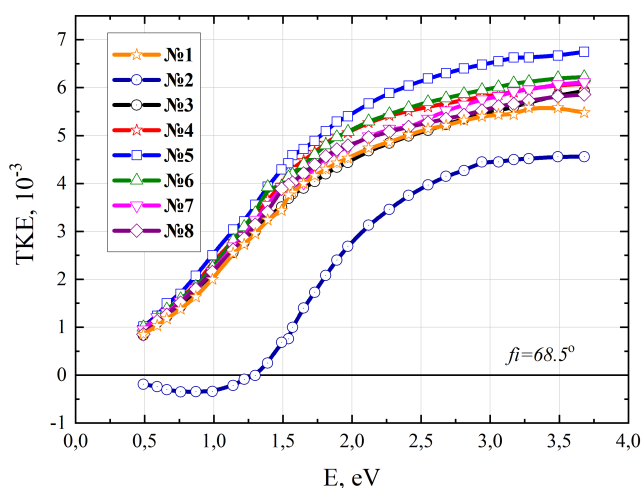
Рис. 16 Магнитопольевые зависимости для второй серии образцов

Для каждого образца установлено значение коэрцитивной силы и намагниченности насыщения (таблица 8). Все образцы характеризуются низкими значениями коэрцитивной силы и высокими значениями намагниченности насыщения, что объясняется преобладанием ферромагнитных металлов в их составе. Отметим, что коэрцитивная сила образца №2 меньше, чем всех остальных образцов, что объясняется преобладанием в его составе кобальта, а не железа, как в случае всех остальных образцов. Колебания же значений намагниченности насыщения в случае всех остальных образцов связано с изменением состава сплавов. Максимальное значение достигается в случае образца №7, в составе которого содержится наибольшее количество никеля.

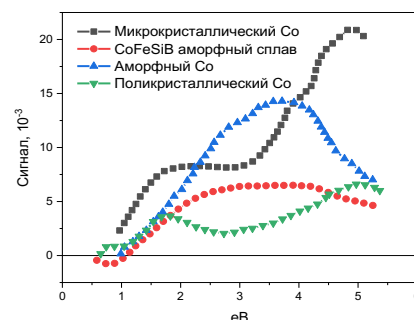
Таблица 8. Магнитные характеристики второй серии образцов

№	Состав	H _c , Oe	M _s , emu/g
1	Fe _{83,9} Co _{2,3} Ni _{6,7} Si _{7,1}	3,0	130,5
2	Fe _{5,1} Co _{91,3} Si _{3,6}	2,8	46,9
3	Fe _{68,5} Ni _{19,1} Si _{4,9} C _{7,5}	3,0	127,1
4	Fe _{81,7} Ni _{10,6} Si _{7,7}	3,1	113,2
5	Fe _{86,6} Ni _{9,6} Si _{3,8}	3,0	129,0
6	Fe _{67,3} Ni _{18,2} Si _{5,1} C _{9,4}	3,0	130,0
7	Fe _{71,6} Ni _{18,7} Si ₅ C _{4,7}	2,9	137,5
8	Fe _{70,5} Ni _{18,3} Si ₅ C _{6,2}	2,9	129,0

Затем были получены спектральные зависимости экваториального эффекта Керра для каждого из образцов этой серии. Они представлены на рисунке 17, а. Полученный вид кривых характерен для полностью аморфных сплавов. Отрицательный сигнал в области низких энергий, полученный для образца №2, объясняется преобладанием в его составе кобальта. Это подтверждает характерный вид спектральной зависимости для аморфного кобальта и аморфных сплавов с его преобладанием (рис. 17, б).



а)



б)

Рис. 17 Спектральные зависимости для: а) второй серии рассматриваемых образцов; б) различных видов кобальта.

Затем на магнитооптической установке «Керр-микроскоп-магнитометр» при комнатной температуре в геометрии экваториального эффекта Керра были измерены петли гистерезиса в приповерхностном слое для каждого образца. Отметим, что для всех образцов этой серии сигнал в геометрии экваториального эффекта Керра был лучше, чем в случае меридионального эффекта Керра, поэтому для измерений была выбрана эта геометрия. Для примера приведём 2 характерные полученные зависимости (рис. 18).

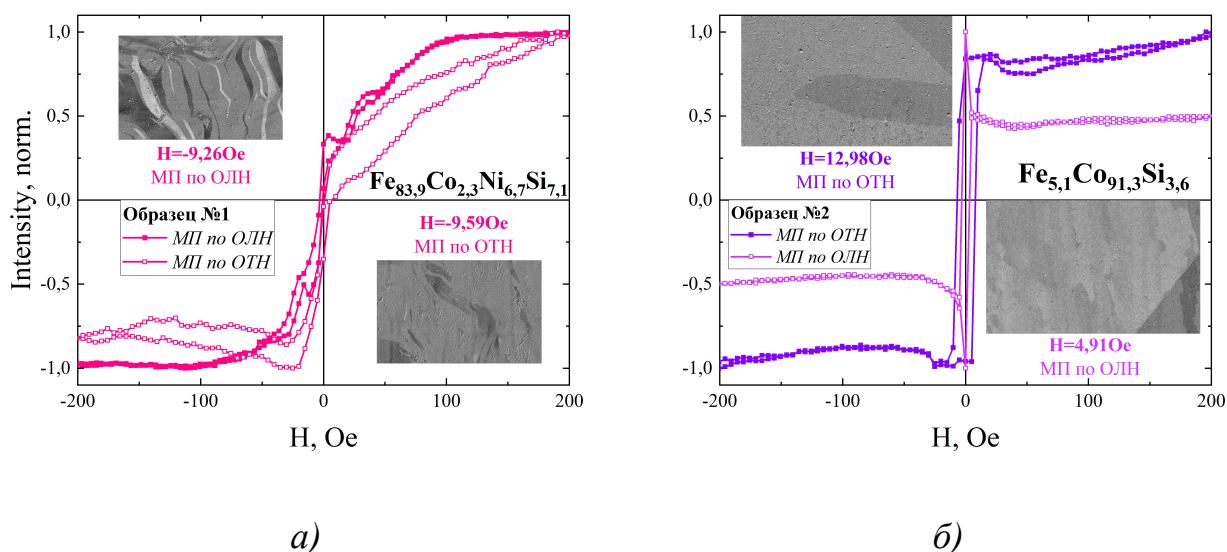
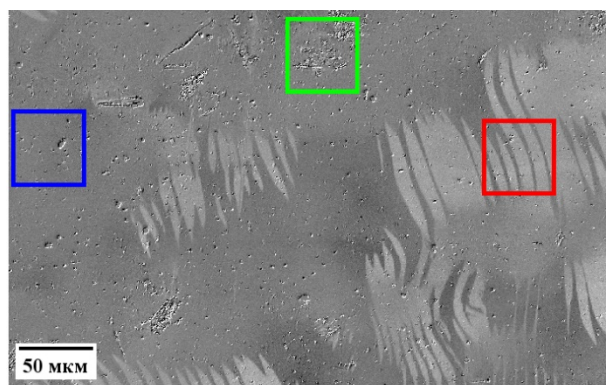


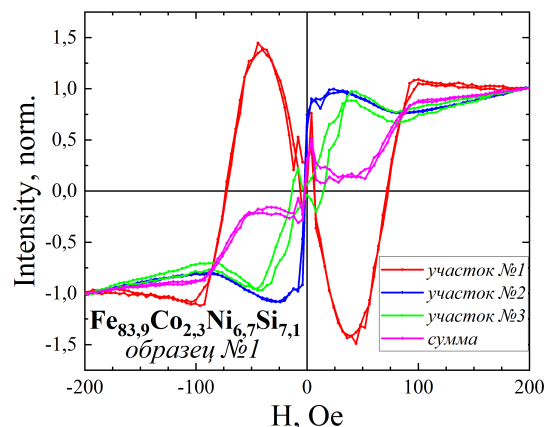
Рис. 18 Магнитополевые зависимости ЭЭК в приповерхностном слое образцов второй серии №1 (а) и №2 (б).

Для образцов №3-№8 петли гистерезиса имели схожий характер с петлёй гистерезиса, полученной для образца №1. Установлено, что эти аморфные ленты не имеют равновесной структуры, сохраняющейся в отсутствии внешнего магнитного поля, которая наблюдалась в случае образцов первой серии.

Петля гистерезиса, полученная для образца №1, обладает большим количеством особенностей, а для образца №2 – имеет стандартный вид. Для уточнения выявленных особенностей был предложен метод, заключающийся в анализе отклика не от всей области рассмотрения, а от различных его участков меньших размеров. Такой метод позволяет изучать вклад от различных участков, учитывая их характерные особенности. Демонстрация метода представлена на рисунке 19.



а)



б)

Рис. 19: а) участки рассмотрения: №1 (красный цвет) – полосовая доменная структура; №2 (синий цвет) – однородное распределение намагниченности; №3 (зеленый цвет) – дефект; б) петли гистерезиса для каждого из участков, (цвет кривых соответствуют цвету области) и для их суммы (розовая кривая).

На рисунке справа показаны полученные полевые зависимости для 3 участков (цвета соответствуют участкам образца справа), их сумме – розовая кривая. Отметим, что область №1 с лабиринтной структурой характеризуется возрастанием намагниченности в отрицательных полях, а затем уменьшением сигнала до полей симметричных значений, а затем вновь возрастанием сигнала при полном перемагничивании образца. Можно отметить, что розовая кривая, показывающая сумму от 3 сигналов, сглаживает это резкое возрастание. Петля гистерезиса для всей области (рис. 17а) не учитывает особенности различных участков.

Таким образом, рассматриваемые образцы характеризуются неравномерным распределением намагниченности в поверхностном слое. Измерения, проведённые на больших участках, демонстрируют суммарный отклик системы, который включает в себя как отклик от дефектов, который может сильно изменять общий сигнал, так и усреднённый сигнал от различных участков.

Можно сделать вывод, что предложенный метод подходит для характеристики различных участков образцов, изучения их однородности. Это особенно важно при использовании аморфных лент для изготовления различных датчиков, для которых важна воспроизводимость свойств.

Основные результаты

В рамках выполнения магистерской диссертации были проведены магнитные и магнитооптические исследования свойств аморфных лент. Экспериментальные исследования были проведены на 2 сериях лент: первая включала в себя разноразмерные образцы на основе никеля, а вторая – образцы одного размера с варьированием элементного состава, основу которого составляли железо, кобальт и никель. Объёмные магнитные свойства изучены с помощью магнитометра с вибрирующим образцом, магнитооптические свойства с помощью спектральной магнитооптической установки и магнитооптического Керр-микроскопа. Автором предложены и апробированы 2 метода: первый позволяет изучать динамику доменных границ в низкочастотных полях, а второй – распределение намагниченности и однородность материала.

В результате проведённых исследований получены следующие результаты:

1. Проведён комплексный анализ магнитных и магнитооптических свойств аморфных лент, которые характеризуются низкими значениями коэрцитивной силы и высоким значением намагниченности насыщения.

2. Предложен метод анализа однородности поверхности и равномерности распределения намагниченности. Метод подходит для характеристики образцов с неравномерным распределением намагниченности. Он позволяет проанализировать отклики от различных участков, что важно для контроля качества материала при производстве.

3. Апробирован метод исследования динамики доменных границ в низкочастотных магнитных полях малой амплитуды при комнатной температуре. Метод подходит для исследования процессов перемагничивания под действием низкочастотных магнитных полей, что особенно важно для материалов с малой коэрцитивной силой.

4. Максимальное смещение доменной границы линейно зависит от амплитуды внешнего поля и не зависит от частоты внешнего магнитного поля, но зависит от ориентации поля относительно осей легкого и трудного намагничивания.

5. Скорость и подвижность ДГ линейно зависят от амплитуды внешнего магнитного поля и отличаются на порядок при перемангничивании по ОЛН и ОТН.

Список литературы

1. Хавроничев С.В., Сошинов А.Г., Галушак В.С., Копейкина Т.В. Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах силовых трансформаторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – №. 12-4. – С. 607-610.
2. Бородихин, А. Ю., Незнахин, Д. С., Фещенко, А. А., Степанова Е. А. Магнитные свойства быстрозакалённых магнитомягких сплавов после термической обработки в атмосфере азота. – Физика. Технологии. Инновации. Тезисы докладов (ФТИ-2021), 2021. – С. 172-173.
3. Ардашева Д.П., Ладьянов В.И., Коновалов М.С., Мокрушина М.И. Структура контактной и свободной сторон быстрозакаленных лент сплава 2НСР в зависимости от скорости охлаждения расплава при спиннинговании. Материалы XV Международной школы-конференции молодых учёных «КоМУ-2023»: Ижевск: УдмФИЦ УрО РАН, 2023. – С. 27.
4. Губанов А.И. Квазиклассическая теория аморфных ферромагнетиков // Физика твердого тела. – 1960. – Т.2. – №3. – С.502-513.
5. Кират Г. Структура, магнитные и магниторезистивные свойства аморфных лент $\text{Co}_{62}\text{Fe}_5\text{Ni}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{14}$. – Физика металлов и металловедение, 2022. – Т. 123. – №3. – С. 240–247.
6. Prabhakara K.H., Шапаева Т.Б., Юрлов В.В., Звездин К.А., Звездин А.К., Davies C.S., Tsukamoto A., Кирилук А.И., Rasing Th., Кимель А.В. Исследование динамики доменной границы GdFeCo методом двукратной высоко скоростной фотографии. Физика твердого тела, 2023. – Т. 65. – Вып. 2. – С. 248–253.
7. Самченко С.В. Измерение подвижности доменных границ аморфных лент с помощью эффекта Керра. – Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2024», 2024.
8. Mingjuan Cai, Jingjing Wang, Qianqian Wang, Zhijun Guo, Qiang Luo, Jing Zhou, Tao Liang, Xuesong Li, Qiaoshi Zeng, Baolong Shen. Improvement of soft-

magnetic properties for Fe-based amorphous alloys with high saturation polarization by stress annealing // *Materials Research Letters*. – 2023. – Vol. 11. – №. 7. – P. 595-603.

9. Huiyun Xiao, Fuyao Yang, Aina He, Bojun Zhang, Yaqing Dong, Jiawei Li, Xuhang Zhang, Yu Han. Enhanced magnetic softness of surface-crystallized Fe-Si-B-Nb-Mo-Cu amorphous alloys via competitive growth of surface pre-crystals/clusters // *Materials Science and Engineering: B*. – 2021. – Vol. 271. – P. 115277.

10. Minhao Han, Cheng Sun, Hongjie Xu, Yang Meng, Qiang Luo, Boying Qiao, Yani Xu, Tao Zhang. Revealing the effect of rapid annealing on nano-crystallization behavior and soft magnetic properties of Fe-Co-B amorphous alloy // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 26. – P. 5425-5436.

11. Wenfeng Zhang, Jianfeng Wang, Cheng Sun, Ting Zhang, Xueying Zhang, Tao Zhang. Effect of Continuous Stress-annealing on the Structure and Magnetic Properties of Fe₇₂. 9Si₁₅. 8B₆. 9Nb₃. 2Cu₁Co_{0.2} Amorphous Alloy // *Metals and Materials International*. – 2023. – T. 29. – №. 10. – C. 3093-3101.

12. Hai N.H., Viet N.H., Oanh N.T. H. Glass-Forming Ability and Magnetic Properties of Al₈₂Fe₁₆Ce₂ and Al₈₂Fe₁₄Mn₂Ce₂ Alloys Prepared by Mechanical Alloying // *Applied Sciences*. – 2023. – T. 14. – №. 1. – C. 152.

13. Hongyu Jiang, Tongtong Shang, Haijie Xian, Baoan Sun, Qinghua Zhang, Qian Yu, Haiyang Bai, Lin Gu, Weihua Wang. Structures and functional properties of amorphous alloys // *Structures and functional properties of amorphous alloys. Small Structures* – 2021. – Vol. 2. – Issue 2. – P. 2000057.

14. Shuang Su, Wenjie Zhao, Yagnesh Shadangi, Jiapeng Zhang, Zhiliang Ning, Jianfei Sun, Yongjiang Huang. Preparation, magnetic and mechanical properties of Fe/Ni-based amorphous fibers // *Materials*. – 2024. – T. 17. – №. 15. – C. 3733.

15. Kurlyandskaya G.V., Lezama L., Pasyunkova A.A., Volchkov S.O., Lukshina V.A., Larrañaga A., Dmitrieva N.V., Timofeeva A.V., Orue I. Amorphous FeCoCrSiB ribbons with tailored anisotropy for the development of magnetic elements for high frequency applications // *Materials*. – 2022. – T. 15. – №. 12. – C. 4160.

16. Correa, M. A., Ferreira, A., Souza, A. L., Dantas Neto, J. M., Bohn, F., Vaz, F., & Kurlyandskaya, G. V. Anomalous Nernst effect in flexible co-based amorphous ribbons //Sensors. – 2023. – T. 23. – №. 3. – C. 1420.
17. Tokmakova E. N., Vvedenskiy V. Y. Effect of annealing in unsaturated magnetic field on the magnetic properties of an amorphous alloy Fe₇₇Ni₁Si₉B₁₃ //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2023. – T. 34. – №. 20. – C. 1509.
18. Murugaiyan, P., Mitra, A., Panda, A. K., Kumar, A. S., Roy, R. K., Manna, K., Srivastava, S. K. Electromagnetic interference shielding effectiveness of amorphous and nanocomposite soft magnetic ribbons // Physica B: Condensed Matter. – 2019. – T. 568. – C. 13-17.
19. Cox, K. C., Bienias, P., Meyer, D. H., Fahey, D. P., Kunz, P. D., Gorshkov, A. V. Spin-wave quantum computing with atoms in a single-mode cavity. // Physical Review Research. – 2022. – T. 4. – №. 3. – C. 033149.
20. Hrabovská, K., Životský, O., Rojíček, J., Fusek, M., Mareš, V., & Jirásková, Y. Surface magnetostriction of FeCoB amorphous ribbons analyzed using magneto-optical Kerr microscopy //Materials. – 2020. – T. 13. – №. 2. – C. 257.
21. Feng, W., Hanke, J. P., Zhou, X., Guo, G. Y., Blügel, S., Mokrousov, Y., & Yao, Y. Topological magneto-optical effects and their quantization in noncoplanar antiferromagnets //Nature Communications. – 2020. – T. 11. – №. 1. – C. 118.
22. Hu, S., Guo, Z., Dong, L., Deng, F., Jiang, H., Chen, H. Enhanced magneto-optical effect in heterostructures composed of epsilon-near-zero materials and truncated photonic crystals //Frontiers in Materials. – 2022. – T. 9. – C. 843265.
23. Li, T., Wang, Y., Jiang, Y., Zhang, S., Luo, L., & Zhang, Z. High-precision measurement of the complex magneto-optical Kerr effect using weak measurement //Applied Physics Letters. – 2024. – T. 124. – №. 5.
24. Овчинникова, Г. И., Белугина, Н. В., Гайнутдинов, Р. В., Иванова, Е. С., Гребенев, В. В., Лашкова, А. К., Толстихина, А. Л.. Температурная динамика доменной структуры триглицинсульфата по данным атомно-силовой микроскопии и диэлектрической спектроскопии //Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58. – №. 11. – С. 2164-2170.

25. Ovcharov, R. V., Ivanov, B. A., Galkina, E. G., Åkerman, J., & Khymyn, R. S. Instability in domain wall dynamics in almost compensated ferrimagnets //arXiv preprint arXiv:2410.08018. – 2024.
26. Шапаева, Т. Б., Юрлов, В. В., Звездин, К. А., Звездин, А. К., Кирилюк, А. И., Рейзинг, Т., & Кимель, А. В. Исследование динамики доменной границы в GdFeCo методом двукратной высокоскоростной фотографии //Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – №. 2. – С. 248-253.
27. А. Малоземов, Дж. Слонзуски. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. перевод с англ. В. В. Волкова, С. А. Кижаяева. - Москва : Мир, 1982. - 382 с.
28. Alliat, I. M., Evans, R. F., Novoselov, K. S., & Santos, E. J. Relativistic domain-wall dynamics in van der Waals antiferromagnet MnPS₃. // npj Computational Materials. – 2022. – Т. 8. – №. 1. – С. 3.
29. Барьяхтар, Ф. Г., Зиновук, А. В., Коновалов, А. Ф., & Приходько, Л. И. Преобразование структуры доменных границ в тонких пленках ферритов-гранатов // Физика твердого тела. – 1987. – Т. 29. – №. 12. – С. 3708-3710.
30. Шур, В. Я., Абрамов, А. С., Аликин, Д. О., Батулин, И. С., Есин, А. А., Зеленовский, П. С., Чезганов, Д. С. Исследование доменной структуры и фазового состава легированных бессвинцовых пьезокерамيك на основе BiFeO₃ и (K, Na) NbO₃: Экспериментальные исследования, обобщение результатов: Этап 2 (заключительный), Екатеринбург. – 2016. – С. 1-47.
31. Перов Н.С., Родионова В.В., Прудникова М.В., Грановский А.Б., Прудников В.Р. Вибрационный магнитометр. Специальный физический практикум // Физический факультет МГУ. Типография Флай-Арт Москва. – 2016. – С. 1-31.
32. Evico magnetics company User instruction for evico magnetics combined overview/high-resolution Kerr Microscope & Magnetometer // 2021. – P. 1–57.
33. Sato K., Ishibashi T. Fundamentals of magneto-optical spectroscopy //Frontiers in Physics. – 2022. – Т. 10. – С. 946515.
34. Maria Hoffmann, Apoorva Sharma, Patrick Matthes, Shun Okano, Olav Hellwig, Ramona Ecke, Dietrich Zahn, Georgeta Salvan and Stefan Schulz. Spectroscopic

ellipsometry and magneto-optical Kerr effect spectroscopy study of thermally treated Co₆₀Fe₂₀B₂₀ thin films //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2019. – Т. 32. – №. 5. – С. 055702.

35. Симдянова М.А., Припеченков И.М., Юрасов А.Н., Ганьшина Е.А., Яшин М.М., Гладышев И.В., Грановский А.Б. Размерный эффект в магнитооптических спектрах наноструктур. XXV Международная конференция Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах (НМММ). Сборник трудов. 2024. – С. 779-781.

36. Sixtus, K. J., Tonks, L. The propagation of large Barkhausen discontinuities along wires // Phys. Rev. – 1930. – Т. 35. – С. 1441.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю профессору, доктору физико-математических наук, заведующему кафедрой магнетизма Перову Николаю Сергеевичу за всестороннюю помощь с научно-исследовательской деятельностью, критические замечания, проявленное внимание и терпение в течение всего процесса обучения.

Автор выражает благодарность за помощь в проведении экспериментов и научно-исследовательской деятельности в целом, поддержку по любым возникающим вопросам и консультации Перовой Наталье Николаевне.

Автор благодарит за наставничество и научные консультации, работу по динамике доменных границ, помощь при подготовке выступлений Шапаеву Татьяну Борисовну. Автор выражает благодарность Симдяновой Марине Александровне и Ганьшиной Елене Александровне за помощь в проведении спектральных измерений. Автор выражает благодарность Грановскому А.Б. и Ражабову Р.М. за предоставленные образцы для проведения исследований.

Автор благодарит весь коллектив кафедры магнетизма за профессионализм, выдержку и поддержку в выполняемой работе.