Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»

На правах рукописи

Собиров Мухаммад Илхомиддинович

Влияние конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных 3d металлов

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток – 2026

Работа выполнена в Лаборатории пленочных технологий Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоёмких технологий и передовых материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Научный руководитель:	**Самардак Александр Сергеевич**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (г. Владивосток), Лаборатория спин-орбитроники Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоемких технологий и передовых материалов, главный научный сотрудник, профессор
Официальные оппоненты:	**Ринкевич Анатолий Брониславович**, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева» Уральского отделения Российской академии наук, (г. Екатеринбург), Лаборатория квантовой наноспинтроники, главный научный сотрудник **Горьковенко Александр Николаевич,** кандидат физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), Отдел магнетизма твердых тел НИИ физики и прикладной математики Института естественных наук и математики, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва

Защита состоится 25.12.2026г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.431.01 при ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» по адресу: 454001 г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Челябинского государственного университета и на сайте https://www.csu.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.431.01, кандидат физ.-мат.
наук Матюнина М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современный технологический прогресс во всех ключевых сферах, от микроэлектроники до медицины, напрямую зависит от создания функциональных материалов с уникальными свойствами. Эти свойства зачастую невозможно получить в традиционных макроскопических материалах, чьи характеристики ограничены объёмными эффектами. В то же время нанотехнологии, оперирующие объектами атомного и нанометрового масштабов, открывают принципиально новые пути управления свойствами материалов за счёт эффектов квантовой размерности, высокой удельной поверхности и точной настройки атомной структуры [1,2]. Одним из самых наглядных примеров плодов нанотехнологий является жёсткий диск на основе магнитных плёнок с атомарной толщиной, который благодаря открытиям в области наномагнетизма на долгие годы стал стандартом компьютерной памяти, благодаря возможности сверхплотной компоновки запоминающих магнитных областей, обусловленной различными наноразмерными эффектами [3]. Однако в последние годы эта технология показала достижение своего физического предела, особенно в контексте скорости записи/чтения и плотности упаковки данных, а существующие альтернативные технологии проигрывают магнитной записи по ряду параметров [4], поэтому для дальнейшего прогресса в области компьютерных технологий, особенно в свете «нейросетевого бума» последних лет, требуется создание запоминающих устройств с принципиально новым подходом к записи информации на основе новых физических эффектов.

Наномагнетизм [5] – активно развивающаяся область науки, которая фокусируется на исследовании наноструктур со сложной формой, которая зачастую определяет их магнитное поведение и создаёт условия для возникновения магнитных эффектов, невозможных в объемных или планарных структурах, а также позволяет перейти к более рациональному трёхмерному использованию пространства в будущих микроэлектронных устройствах. Ключевыми объектами этой области являются одномерные (1D) ферромагнитные наноструктуры такие как нанопроволоки [6], нанотрубки [7] и нанопружины [8], в которых под действием сильной анизотропии формы образуется целый спектр нетривиальных микромагнитных конфигураций и эффектов [9].

Сильная анизотропия формы является не единственной анизотропией в таких наноструктурах, и эффективная анизотропия полученного нанообъекта зачастую формируется из комбинации различных вкладов от формы, кристаллической структуры, механических напряжений и магнитостатических взаимодействий в массиве. Особенно интересным случаем являются наноструктуры на основе ГПУ-Co, ввиду присутствия в них одноосной магнитокристаллической анизотропии, сравнимой по величине с анизотропией формы, и пространственной ориентацией которой возможно управлять в процессе синтеза, варьируя потенциал осаждения, кислотность электролита и другие параметры [10-12]. Сочетание управляемой магнитокристаллической анизотропии с анизотропией формы создаёт уникальный и мощный механизм для точной настройки магнитных свойств и микромагнитной конфигурации 1D наноструктур, что необходимо для целенаправленного дизайна новых функциональных материалов и создания элементов магнитной памяти нового поколения. Актуальность и востребованность настоящего исследования подтверждается участием автора работы в выполнении грантов и проектов:

1. Грант РНФ 24-72-10088 «Ферромагнитные нанопроволоки типа «медуза» и сегментированные аморфно-кристаллические нанопроволоки как элементы компьютерной памяти следующего поколения», 2024–2025, ключевой исполнитель.

2. Проект № АСП-25-03-2.10-0024 «Сегментированные нанопроволоки для магнитной памяти нового поколения» по программе развития ДВФУ в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», руководитель.

Цель диссертационной работы

Целью работы является установление физических закономерностей конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии в одномерных ферромагнитных наноструктурах на основе переходных 3d-металлов путём систематического варьирования их морфологии (цилиндрические проволоки, структуры с геометрической модуляцией), состава (Fe, Co, Ni, сплавы Co–W) и кристаллической текстуры, а также выявление условий, при которых происходит смена доминирующего типа анизотропии и переориентация оси лёгкого намагничивания относительно длинной оси наноструктур.

Для достижения данной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Синтезировать массивы цилиндрических нанопроволок Fe, Co и Ni с идентичными геометрическими параметрами (диаметр ~40–45 нм, межосевое расстояние ~85 нм) и на основе анализа угловых зависимостей петель гистерезиса и FORC-диаграмм количественно разделить вклад анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии в эффективное поле магнитной анизотропии каждого типа нанопроволок.
2. Установить, как текстурирование ГПУ-фазы в Co нанопроволоках (диаметр ~40 нм) влияет на формирование многодоменной структуры и рост магнитостатических взаимодействий в массиве (H_u), а также экспериментально проверить гипотезу о снижении межпроволочных взаимодействий за счёт искусственного введения разброса длин на примере Fe нанопроволок.
3. Разработать метод электроосаждения для получения градиентных нанопроволок Co–CoW с плавным изменением состава от чистого Co до аморфного CoW и исследовать влияние продольного градиента на кристаллическую структуру, внутренние напряжения и ориентацию оси лёгкого намагничивания с использованием метода распределения полей анизотропии (AFD).
4. Реализовать синтез двухслойных пористых матриц оксида алюминия с соотношением диаметров пор в слоях от 1:5 до 1:3 (при напряжениях анодирования 150/50–70 В) и получить на их основе массивы Ni нанопроволок типа «медуза» с заданными геометрическими параметрами «голов» (~270 нм) и «ног» (50–100 нм).
5. На основе микромагнитного моделирования и MCM-визуализации установить механизмы зарождения и эволюции вихревых и поперечных доменных стенок в нанопроволоках типа «медуза» и оценить динамику их движения под действием спин-поляризованного тока (в расчётном режиме), а также определить, как соотношение диаметров «ног» влияет на тип и скорость доменных стенок.
6. Синтезировать двухсегментные нанопроволоки Co/Ni и Ni/Co типа «медуза» и установить, как взаимное расположение сегментов Co и Ni влияет на направление эффективной анизотропии в каждом сегменте, а также определить, при каком соотношении диаметров Co-сегментов (≈100 нм в «ногах» против ≈300 нм в «головах») происходит смена доминирующей роли формы и магнитокристаллической анизотропии.

Научная новизна

1. Впервые количественно установлено с использованием метода FORC-диаграмм, что в массивах поликристаллических Co нанопроволок диаметром ~40 нм с текстурированной ГПУ-фазой эффективное поле магнитостатического взаимодействия H_u

достигает ~2500 Э, что превышает соответствующее значение для Fe нанопроволок (2042 Э), несмотря на меньшую намагниченность насыщения Co. Микромагнитное моделирование показало, что это аномальное усиление взаимодействий обусловлено нетривиальной многодоменной структурой, возникающей из-за конкуренции анизотропии формы и одноосной магнитокристаллической анизотропии с преимущественной ориентацией *c*-осей в поперечном направлении. На примере Fe нанопроволок с неравномерным распределением длин (разброс ±0,8 мкм) продемонстрировано, что такая морфологическая неоднородность приводит к снижению ближних межпроволочных взаимодействий за счёт перераспределения магнитных полюсов на более удалённые структуры - эффект, количественно описанный в рамках модифицированной теории среднего поля.

2. Впервые синтезированы градиентные нанопроволоки Co–CoW с контролируемым переходом от кристаллического ГПУ-Co до аморфного сплава $Co_{78}W_{22}$. Установлено, что продольный градиент состава индуцирует внутренние механические напряжения и изменение кристаллической структуры, что приводит к переориентации оси лёгкого намагничивания из продольного (для однородных Co и CoW) в поперечное направление, при этом эффективное поле анизотропии снижается с 1560 Э (Co) до 540 Э. В распределении полей анизотропии (AFD) выявлены два максимума, соответствующие кристаллической и аморфной фазам, что подтверждает возможность управления магнитной анизотропией через состав без изменения геометрии.

3. Разработан оригинальный метод синтеза двухслойных пористых матриц оксида алюминия с соотношением диаметров пор в слоях от 1:5 до 1:3 (при напряжениях анодирования 150/50–70 В), позволивший впервые получить массивы Ni нанопроволок нетривиальной геометрии типа «медуза» (диаметр «голов» ~270 нм, «ног» 50–100 нм). Методом FORC-диаграмм выявлено наличие двух магнитных подсистем с различной анизотропией формы: «головы» характеризуются низкой коэрцитивностью и сильными межструктурными взаимодействиями (H_u до 2380–3200 Э), а «ноги» - более высокой коэрцитивностью и слабыми взаимодействиями (H_u ~360–1100 Э). Микромагнитное моделирование раскрыло механизмы переключения, включая зарождение и слияние вихрей в «головах» с образованием конфигурации типа «штопор», а также движение поперечных и вихревых доменных стенок в «ногах».

4. Впервые синтезированы двухсегментные нанопроволоки Co/Ni и Ni/Co типа «медуза» с однородным заполнением сегментов заданными материалами. Установлено, что в сегментах Co, находящихся в «головах» (диаметр ~300 нм), доминирует магнитокристаллическая анизотропия, ориентирующая лёгкую ось перпендикулярно длинной оси наноструктуры, тогда как в Co «ногах» (диаметр ~100 нм) определяющей становится анизотропия формы. Это приводит к возникновению гибридных петель гистерезиса с аномально высоким полем насыщения вдоль оси (до 14 кЭ для Co/Ni против 3,5 кЭ для чисто Ni-структур) и к снижению магнитостатических взаимодействий в массиве (H_u = 634–734 Э против 1090 Э для Ni) за счёт замыкания магнитного потока внутри объёма Co-сегментов.

Научная и практическая значимость работы:

1. Разработанный метод синтеза двухслойных пористых матриц оксида алюминия с регулируемым соотношением диаметров пор в слоях (от 1:5 до 1:3) расширяет технологические возможности получения одномерных наноструктур с нетривиальной геометрией. Предложенный подход может быть использован для создания шаблонов с разветвлённой поровой структурой, применимых не только в магнитных материалах, но и в мембранных технологиях, фильтрации, фотонике и сенсорике.

2. Результаты исследования массивов нанопроволок с геометрической модуляцией («медуза») демонстрируют принципиальную возможность управления двухстадийным перемагничиванием за счёт изменения соотношения диаметров «голов» и «ног», что может быть использовано для создания мультибитных ячеек хранения информации, где разные сегменты соответствуют различным логическим состояниям. Микромагнитное моделирование показало, что при пропускании спин-поляризованного тока (в расчётном режиме) возможна генерация и перемещение доменных стенок вдоль «ног» со скоростями 570–950 м/с, что открывает перспективы для разработки элементов памяти на движущихся доменных стенках при условии дальнейшей оптимизации (снижении требуемых плотностей тока и учёте тепловых эффектов).

3. Возможность контролировать направление эффективной анизотропии за счёт выбора материала сегментов (Co или Ni) и их геометрии позволяет проектировать наноструктуры с заданными магнитными характеристиками. Это может найти применение в создании логических элементов спинтроники, где требуется различная ориентация лёгких осей в разных частях одного нанообъекта (например, для реализации функциональных вентилей или устройств с магнитным взаимодействием между сегментами).

4. Новые типы нанопроволок («медуза», сегментированные Co/Ni, градиентные Co–CoW) обладают потенциалом для применения в биомедицине. Их особая морфология (наличие «голов» и «ног») может быть использована для адресной доставки лекарств и фиксации в тканях, а возможность переключения сегментов в разных полях - для управления нагревом при магнитной гипертермии с повышенной локальностью.

5. Полученные экспериментальные данные и микромагнитные модели могут быть использованы в учебных курсах по физике конденсированного состояния, наноматериалам и спинтронике (например, при изучении методов FORC-диаграмм, основ микромагнитного моделирования, влияния анизотропии на магнитные свойства). Разработанные методики синтеза и анализа могут служить основой для лабораторных практикумов в магистратуре и аспирантуре.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что в массивах поликристаллических нанопроволок Co диаметром ~40 нм с текстурированной ГПУ-фазой эффективная магнитная анизотропия формируется как результат конкуренции одноосной магнитокристаллической анизотропии (с преимущественной ориентацией *c*-осей в поперечном направлении) и анизотропии формы. Это приводит к возникновению сложной многодоменной структуры, которая, в отличие от однодоменных Fe и Ni нанопроволок, увеличивает магнитостатические взаимодействия между соседями, что количественно подтверждено FORC-диаграммами (рост поля взаимодействия H_u до 2500 Э против 2042 Э для Fe).

2. Показано, что неравномерное распределение длин (разброс ±0,8 мкм при средней длине 2,3 мкм) в массивах Fe нанопроволок приводит к смещению точек замыкания магнитного потока на более удалённые структуры, что ослабляет ближние магнитостатические взаимодействия и снижает эффективное поле размагничивания. Этот эффект количественно описан в рамках модифицированной теории среднего поля с введением поправок на шероховатость рельефа.

3. Разработан метод синтеза градиентных нанопроволок Co–CoW с плавным изменением состава от чистого Co до аморфного сплава $Co_{78}W_{22}$. Установлено, что градиент состава индуцирует внутренние механические напряжения и изменение кристаллической структуры, что приводит к переориентации оси лёгкого намагничивания из продольного (для однородного Co и CoW) в поперечное направление. Эффективное поле анизотропии

при этом снижается с 1560 Э (Co) до 540 Э (CoW), а в распределении полей анизотропии (AFD) наблюдаются два максимума, соответствующие кристаллической и аморфной фазам.

4. Впервые синтезированы двухслойные пористые матрицы оксида алюминия с соотношением диаметров пор в слоях от 1:5 до 1:3, позволившие методом электроосаждения получить массивы Ni нанопроволок с нетривиальной геометрией типа «медуза» (диаметр «голов» ~270 нм, «ног» 50–100 нм). Микромагнитное моделирование и FORC-анализ выявили двухстадийный механизм перемагничивания: при малых полях переключаются «головы» (вихревые и «штопорные» конфигурации), при больших - «ноги» (поперечные и вихревые доменные стенки). Показано, что скорость движения доменных стенок под действием спин-поляризованного тока (в расчётном режиме) составляет 570–950 м/с в зависимости от диаметра «ног».

5. Установлено, что в двухсегментных нанопроволоках Co/Ni типа «медуза» направление эффективной анизотропии определяется типом сегмента: в Co-сегментах доминирует магнитокристаллическая анизотропия с осью лёгкого намагничивания, перпендикулярной оси проволоки (для «голов») или конкурирующая с формой (для «ног»), а в Ni-сегментах - анизотропия формы. Это приводит к гибридной форме петель гистерезиса, в которых поле насыщения вдоль оси составляет 14 кЭ (против 3.5 кЭ для чисто Ni-структур), а магнитостатические взаимодействия в массиве ослаблены (H_u = 634–734 Э против 1090 Э для Ni) за счёт замыкания магнитного потока внутри Co-сегментов.

Достоверность полученных научных результатов

Результаты, представленные в данной работе, получены экспериментально с использованием современных взаимодополняющих методов исследования. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается воспроизводимостью результатов, сходимостью экспериментальных данных с микромагнитным моделированием и теоретическими оценками, проведенными в ходе исследования. Материалы данной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационного исследования были представлены автором лично на российских и международных школах, конференциях и симпозиумах: Международный симпозиум SISM 2026 (Samarkand International Symposium on Magnetism, Самарканд, Республика Узбекистан); международный симпозиум ISAMMA 2026 (The 6th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, Пусан, Республика Корея); международный симпозиум EASTMAG-2025 (IX Евро-азиатский симпозиум «Тренды в магнетизме», Южно-Сахалинск, Россия); международная конференция IcAUMS-2025 (The 7th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies, Наха, Япония); международная конференция ННММ-2024 (Новое в магнетизме и магнитных материалах, Москва, Россия); международный симпозиум ISAMMA-2024 (The 5th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, Донгхой, Вьетнам); молодежная школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024, Гатчина, Ленинградская область); международная конференция SISM-2023 (Samarkand International Symposium on Magnetism, Самарканд, Республика Узбекистан); международный симпозиум EASTMAG-2022 (VIII Евро-азиатский симпозиум «Тренды в магнетизме», Казань, Россия); международная научная школа-конференция ASCO-NANOMAT-2022 (Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, Владивосток, Россия).

Личный вклад автора заключается в:

– экспериментальном получении пористых матриц оксида алюминия, используемых в качестве шаблонов для синтеза наноструктур, в том числе двухслойных пористых матриц для получения нанопроволок типа «медуза»;

– электрохимическом осаждении нанопроволок Fe, Co, Ni, градиентных нанопроволок Co-CoW, нанопроволок Ni и Co/Ni типа «медуза»;

– пробоподготовке двухслойных пористых матриц и нанопроволок с разной морфологией, исследовании структуры, элементного состава с помощью методов растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии;

– исследовании магнитных свойств полученных наноструктур с использованием методов вибрационной магнитометрии и FORC-диаграмм;

– микромагнитном моделировании двухсегментных нанопроволок Co/Ni типа «медуза»;

– обработке и анализе экспериментальных данных и результатов микромагнитного моделирования, обобщении и оценке полученных результатов.

Исследование методами атомно-силовой и магнито-силовой микроскопии проводилось совместно с Рогачевым Кириллом Алексеевичем и Шишеловым Александром Федоровичем. Моделирование доменной структуры нанопроволок и электрохимическое осаждение нанопроволок типа «медуза» проводились совместно с Самардаком Алексеем Юрьевичем. Рентгеноструктурный анализ образцов производился совместно с Лембиковым Алексеем Олеговичем и Писаревым Савелием Михайловичем. Оценка эффективного поля магнитной анизотропии проводилась совместно с Комогорцевым Сергеем Викторовичем. Получение двухслойных пористых матриц осуществлялось при содействии Рахматуллаева Темура Рустамовича, Саповского Игоря Михайловича и Ильина Никиты Валерьевича. Огнев Никита Алексеевич и Лейко Григорий Алексеевич принимали участие в синтезе некоторых пористых матриц и пробоподготовке нескольких образцов. Материалы к публикациям подготавливались совместно с научным руководителем и обозначенными выше коллегами.

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 4 научных статьях, опубликованных в рецензируемых зарубежных журналах, индексируемых базами научного цитирования Web of Science и Scopus и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций. Также по теме диссертации было опубликовано 10 тезисов докладов и материалов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 154 наименований. Общий объем диссертации – 166 страниц, включая 52 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературных источников, описывающих методы синтеза и основные магнитные свойства одномерных ферромагнитных наноструктур. Рассмотрены основные методы получения нанопроволок, включая шаблонные подходы и возможности создания структур с нетривиальной геометрией. Проанализированы источники магнитной анизотропии, вклад анизотропии формы и магнитокристаллической

анизотропии в эффективную магнитную анизотропию, а также роль магнитостатических взаимодействий в массивах. Особое внимание уделено нетривиальным магнитным конфигурациям и перспективам применения одномерных наноструктур в спинтронике и магнитной памяти.

Во второй главе описаны экспериментальные методики, применённые в работе. Приведено описание процессов формирования пористых матриц оксида алюминия и электрохимическом осаждении нанопроволок. Изложены основы методов исследования морфологии (растровая электронная микроскопия, РЭМ), состава (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, ЭДРС), структуры (рентгеноструктурный анализ), магнитных свойств (вибрационная магнитометрия, метод FORC-диаграмм), а также описаны подходы для визуализации магнитной конфигурации на основе анализа создаваемых наноструктурами полей рассеивания (магнитно-силовая микроскопия) и микромагнитного моделирования.

В третьей главе представлены результаты исследования массивов однородных по составу Fe, Co и Ni нанопроволок и градиентных Co-CoW нанопроволок с простейшей геометрией цилиндра для исследования влияния морфологии и кристаллической структуры на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных *3d* металлов [А2, А3]. Синтез нанопроволок Fe, Co, Ni, Co-CoW осуществлялся методом электрохимического осаждения с использованием пористых матриц оксида алюминия в качестве шаблонов. Морфология Fe, Co, Ni, Co-CoW определялась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) (рисунок1(а-в, д)). Анализ РЭМ снимков показал, что, несмотря на одинаковое время роста, нанопроволоки Fe имели крайне неравномерное распределение длины, тогда как длины других образцов были гораздо более равномерными: l_{Fe} = 2,3±0,8 мкм, l_{Co} = 2,9±0,3 мкм, l_{Ni} = 2,0±0,2 мкм. Их диаметр равен D = 45±5 нм.

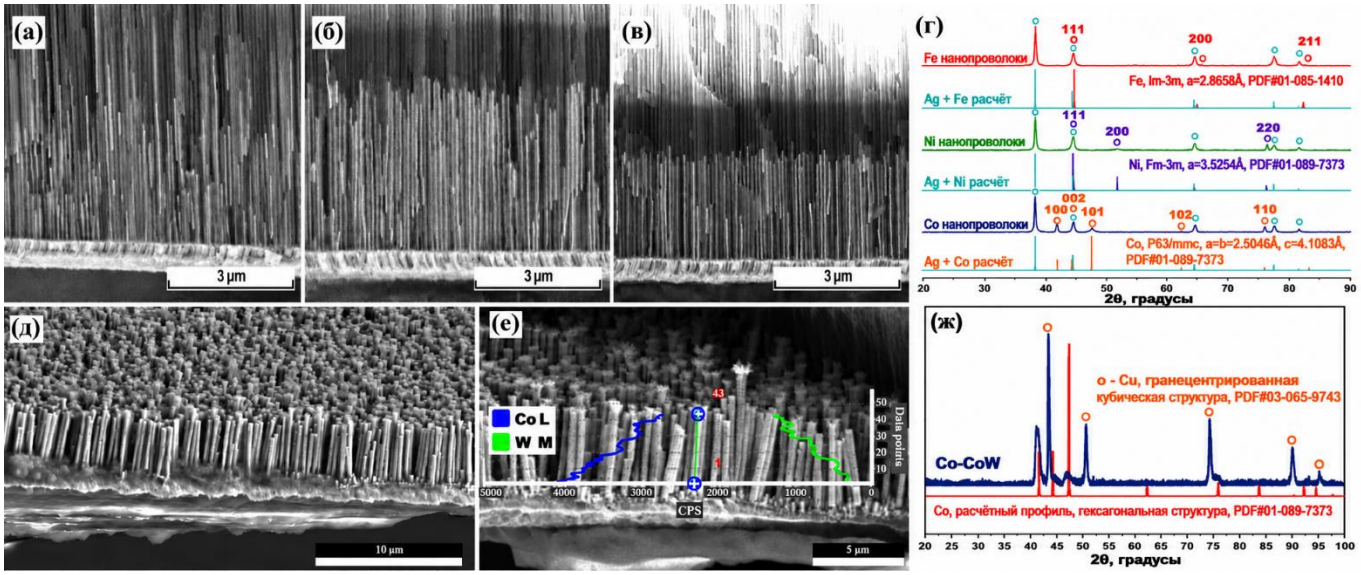


Рисунок 1 – Микроизображения массивов нанопроволок, полученные РЭМ: (а) Fe, (б) Co, (в) Ni и (д) Co-CoW нанопроволоки на сколе пористой матрицы оксида алюминия, (е) результат ЭДРС-анализа градиентных нанопроволок CoW. Рентгеновские дифрактограммы нанопроволок: (г) Fe, Co, Ni и (ж) Co-CoW

Длина градиентных нанопроволок CoW составляет $l_{Co\text{-}CoW}$ = 5,0±0,2 мкм. Анализ элементного состава градиентных нанопроволок осуществлялся методом ЭДРС с использованием РЭМ, и показал плавный переход от чистого Co к сплаву $Co_{78}W_{22}$ (рисунок 1 (е)). Кристаллическая структура образцов исследовалась с помощью рентгеновской дифракции (РД). Фазовый состав образцов представлен чистым Fe (ОЦК), Co (ГПУ) и Ni

(ГЦК) (рисунок 1(г)). Для Co интенсивность отражений ГПУ-фазы указывает на возможную текстуру с ориентацией *c*-оси поперёк длинной стороны нанопроволоки. Средние размеры кристаллитов лежат в диапазоне 40–50 нм для образцов Fe, Co, Ni, около 29нм для Co-CoW (рисунок 1(ж)).

Магнитные свойства Fe, Co и Ni нанопроволок были исследованы с помощью вибрационного магнитометра (рисунок 2 (а-в)). На основе анализа петель магнитного гистерезиса показано, что легкая ось намагничивания во всех образцах направлена вдоль длинной оси нанопроволок (θ = 0°). При параллельном внешнем магнитном поле (**H**) величина H_c составила 985, 555 и 905 Э, величина m_r/m_s - 0,56, 0,24 и 0,83 для Fe, Co и Ni соответственно. При перпендикулярном направлении **H** эти значения значительно уменьшились: H_c = 88, 569 и 66 Э, m_r/m_s = 0,01, 0,13 и 0,04. Низкое значение m_r/m_s для Co в параллельном поле может объясняться не только магнитостатическим взаимодействием, но и возможным влиянием магнитокристаллической анизотропии ГПУ-фазы, ориентированной перпендикулярно длинной оси нанопроволок из-за текстурирования при электроосаждении.

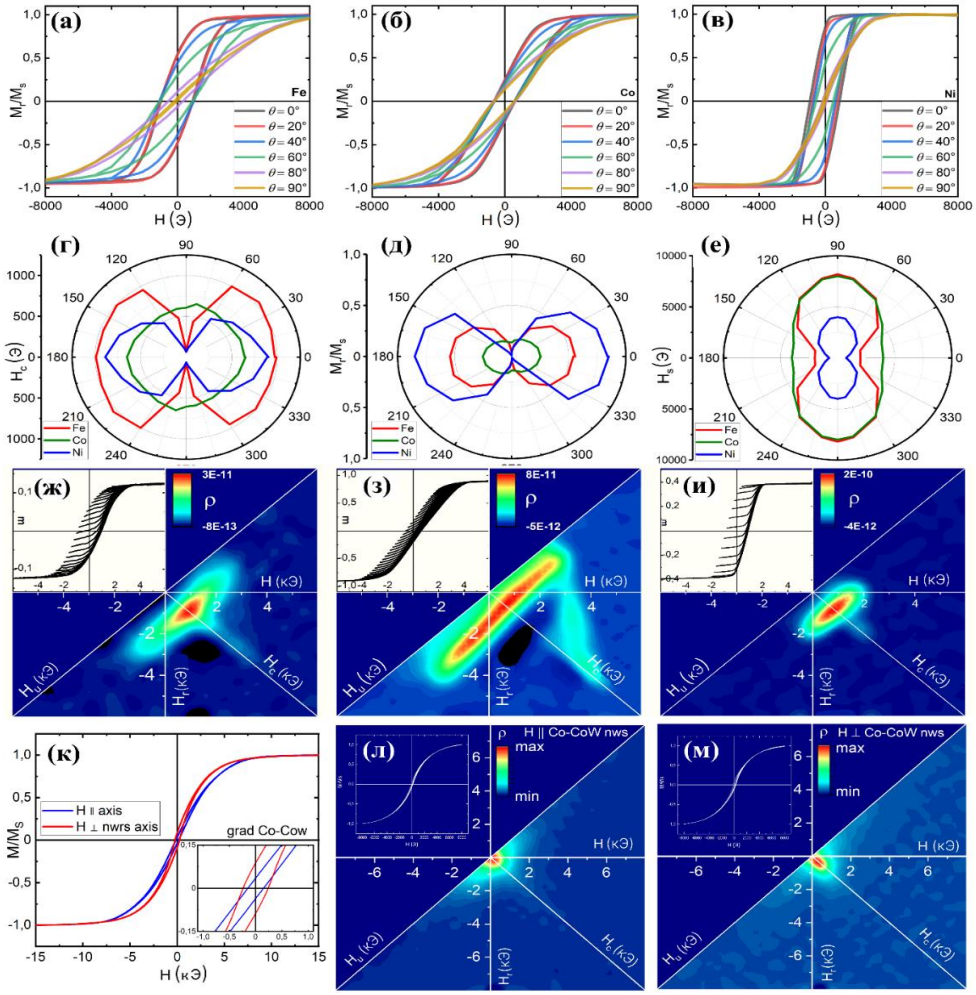


Рисунок 2 – Петли магнитного гистерезиса массивов нанопроволок (а) Fe, (б) Co и (в) Ni, полученные при разных углах θ между **H** и длинной стороной нанопроволок; (к) петли магнитного гистерезиса массивов нанопроволок Co-CoW. Угловые зависимости (г) коэрцитивной силы H_c, (д) отношения остаточного магнитного момента к магнитному моменту в насыщении m_r/m_s и (е) поля насыщения H_s. При θ = 0° **H** направлено параллельно длинной оси нанопроволок, θ = 90° **H** – перпендикулярно. FORC-диаграммы массивов (ж) Fe, (з) Co, (и) Ni, (л) Co-CoW нанопроволок в **H**, направленном параллельно их длинной оси и (м) Co-CoW нанопроволок в **H**, направленном перпендикулярно их длинной оси. Вставки показывают соответствующие наборы минорных кривых намагничивания

Угловые зависимости (рисунок 2 (г-д)) подтвердили выраженную одноосную анизотропию Fe и Ni: значения H_c и m_r/m_s уменьшались при отклонении поля от длинной оси нанопроволок. Для Co эти параметры практически не зависели от угла, что указывает на близкое к изотропному поведение и может быть связано с конкуренцией анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии. При этом выраженная угловая зависимость поля насыщения H_s показывает, что вклад анизотропии формы в Co сохраняется. Для дополнительного анализа массивов Fe, Co и Ni использовали FORC-диаграммы (рисунок 2 (ж-и)), позволяющие определить распределение коэрцитивных сил H_c и поле H_u. При **H**, параллельном оси нанопроволок, FORC-диаграммы всех трёх материалов содержат основной интенсивный пик, вытянутый вдоль H_u и сравнительно узкий по H_c. Для Fe он соответствует H_{cd} =549–1388 Э при H_u =2042 Э. В Co пик смещён в область меньших коэрцитивных сил, H_{cd} =69–938 Э, что связывается с влиянием магнитокристаллической анизотропии ГПУ-Co. Максимальное H_u достигает 2500 Э, несмотря на меньшую по сравнению с Fe намагниченность насыщения. Для Ni распределение близко к Fe: H_{cd} =507–1147 Э, однако H_u =860 Э, что примерно вдвое меньше, чем у Fe, и согласуется с меньшей намагниченностью насыщения Ni и слабым вкладом магнитокристаллической анизотропии.

Градиентные нанопроволоки Co–CoW также исследовались методом FORC-диаграмм при продольном и поперечном направлениях поля (рисунок 2 (л, м)). При продольном **H** плотность ρ сосредоточена в узком пике вблизи начала координат и имеет широкое распределение по H_u до ~3 кЭ, указывающее на заметные межструктурные магнитостатические взаимодействия. При поперечном поле распределение локализовано вблизи H_u =0, тогда как широкий диапазон H_c связывается с градиентом состава, изменением магнитных параметров (λ_S, M_S) и локальными механическими напряжениями, влияющими на эффективную анизотропию через магнитоупругую связь.

Для установления причин наблюдаемого магнитного поведения проведено микромагнитное моделирование в MuMax[3]. Геометрические параметры модели соответствовали эксперименту: диаметр нанопроволок составлял 45±5нм, межпроволочное расстояние 70-85 нм, длина 1700-3000 нм для Fe, 2900–3100 нм для Co и 1950–2250 нм для Ni. Значения M_s, обменной жёсткости A_{ex} и констант магнитной анизотропии задавались с учётом поликристаллической структуры материалов. Для Co моделировался текстурированный поликристалл с преимущественно поперечной ориентацией оси магнитокристаллической анизотропии. Достоверность модели проверялась сравнением экспериментальных и рассчитанных петель гистерезиса для массивов из 16 гексагонально упорядоченных нанопроволок. Получено хорошее качественное и количественное соответствие для обеих ориентаций **H**, а небольшие различия обусловлены упрощениями модели.

Моделирование размагниченного состояния выявило существенные различия микромагнитной структуры и полей рассеивания (рисунок 3). Fe и Ni сохраняли сравнительно простую однодоменную конфигурацию с магнитными полюсами преимущественно на концах. Для Fe значительный разброс длин приводил к тому, что магнитный поток часто замыкался не на ближайших соседях, а на более удалённых нанопроволоках сопоставимой длины. В результате формировалась пространственно распределённая система магнитостатических связей, объясняющая выраженный наклон экспериментальной петли гистерезиса. Наиболее сложное состояние наблюдалось для Co. В размагниченном состоянии формировалась неоднородная структура с локальными областями, где вектор намагниченности ориентирована преимущественно перпендикулярно длинной оси. Это связано с конкуренцией анизотропии формы, стремящейся ориентировать намагниченность вдоль нанопроволоки, и магнитокристаллической анизотропии ГПУ-Co,

направленной преимущественно поперечно. Магнитный поток замыкался через многочисленные локальные источники вдоль всей длины проволок, формируя сложную трёхмерную картину взаимодействий. Такая микромагнитная структура объясняет аномально высокие значения H_u для Co на FORC-диаграммах по сравнению с Fe и Ni, где взаимодействия в большей степени определяются магнитными полюсами на концах нанопроволок.

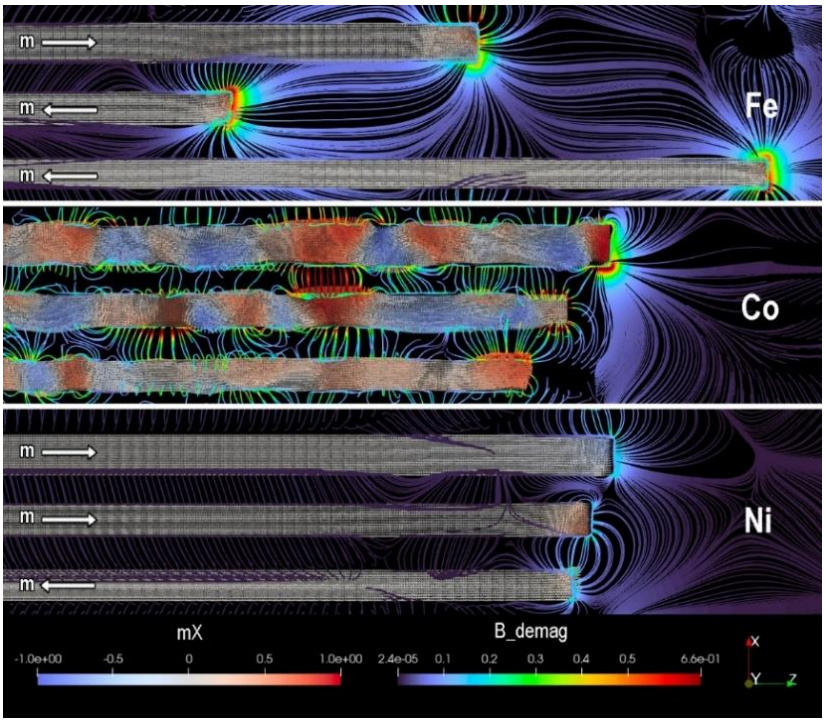


Рисунок 3 – Конфигурация намагниченности M и распределение полей рассеивания B_{demag} в размагниченных массивах нанопроволок Fe, Co и Ni

В четвертой главе описаны синтез и исследование однородных по составу Ni-нанопроволок с нетривиальной геометрией типа «медуза», включающих сегменты с большим диаметром – «головы» и маленьким – «ноги» [А4]. Впервые разработаны методики получения двухслойных пористых матриц оксида алюминия (ДПМА) и последующего электроосаждения в них таких наноструктур. Диаметр пор регулировали напряжением анодирования U, при этом критическим условием формирования геометрии «медуза» было выполнение соотношения $U_2 < 0{,}6U_1$. Для первого слоя использовали U_1 = 150 В, а для второго – 50, 60 и 70 В для образцов JFS1, JFS2 и JFS3 соответственно.

Первое анодирование проводили в 5% H_3PO_4 при 0–1 °C в течение 30 мин, после чего напряжение снижали до 120 В для уменьшения толщины барьерного слоя. Далее матрицы дополнительно травили в смеси H_2CrO_4/H_3PO_4. Второе анодирование выполняли в 3% $H_2C_2O_4$ при 1 °C и U_2 = 50, 60 и 70 В в течение 300, 140 и 60 мин соответственно. После удаления остаточного Al и барьерного слоя морфологию ДПМА исследовали методом РЭМ.

Для первого слоя диаметры пор составляли D_1 = 262±30, 279±28 и 273±26 нм, межпоровое расстояние r_1 = 305±31, 308±44 и 304±36 нм, длина пор l_1= 1934±71, 1982±51 и 1954±39 нм для образцов JFS1, JFS2 и JFS3 соответственно. Во втором слое диаметр пор последовательно увеличивался с ростом U_2: D_2 = 53±9, 79±19 и 99±17 нм, межпоровое расстояние r_2 = 118±18, 141±19 и 151±17 нм, длина пор l_2 = 13,8, 18,1 и 14,7 мкм. Толщина стенки между соседними порами во втором слое также уменьшалась по мере увеличения потенциала анодирования, и составила D_{wall} = 65±13, 62±19 и 52±17 нм для образцов JFS1, JFS2 и JFS3 соответственно.

Для электроосаждения Ni на поверхность ДПМА наносили проводящий слой Ag толщиной 600 нм. Осаждение проводили из раствора Уоттса при 35 °C в гальваностатическом режиме при I = 2 мА. Анализ зависимости напряжения от времени позволил выделить стадии осаждения Ni на Ag, заполнения пор первого слоя, перехода к узким порам второго слоя и дальнейшего роста нанопроволок.

РЭМ-анализ показал, что геометрия «голов» была практически одинаковой для всех образцов: диаметр около 270 нм, длина около 1,95 мкм. Диаметры «ног» составляли 53±9, 79±19 и 99±17 нм, а их длины – 9327±750, 10240±525 и 10324±640 нм для JFS1, JFS2 и JFS3 соответственно. Таким образом, изменение U_2 позволяло систематически регулировать диаметр «ног» и расстояние между соседними нанопроволоками при близкой геометрии «голов». Рентгеноструктурный анализ показал, что полученные Ni-нанопроволоки имеют гранецентрированную кубическую решётку (рисунок 4(з)), а средний размер кристаллитов составляет около 27 нм.

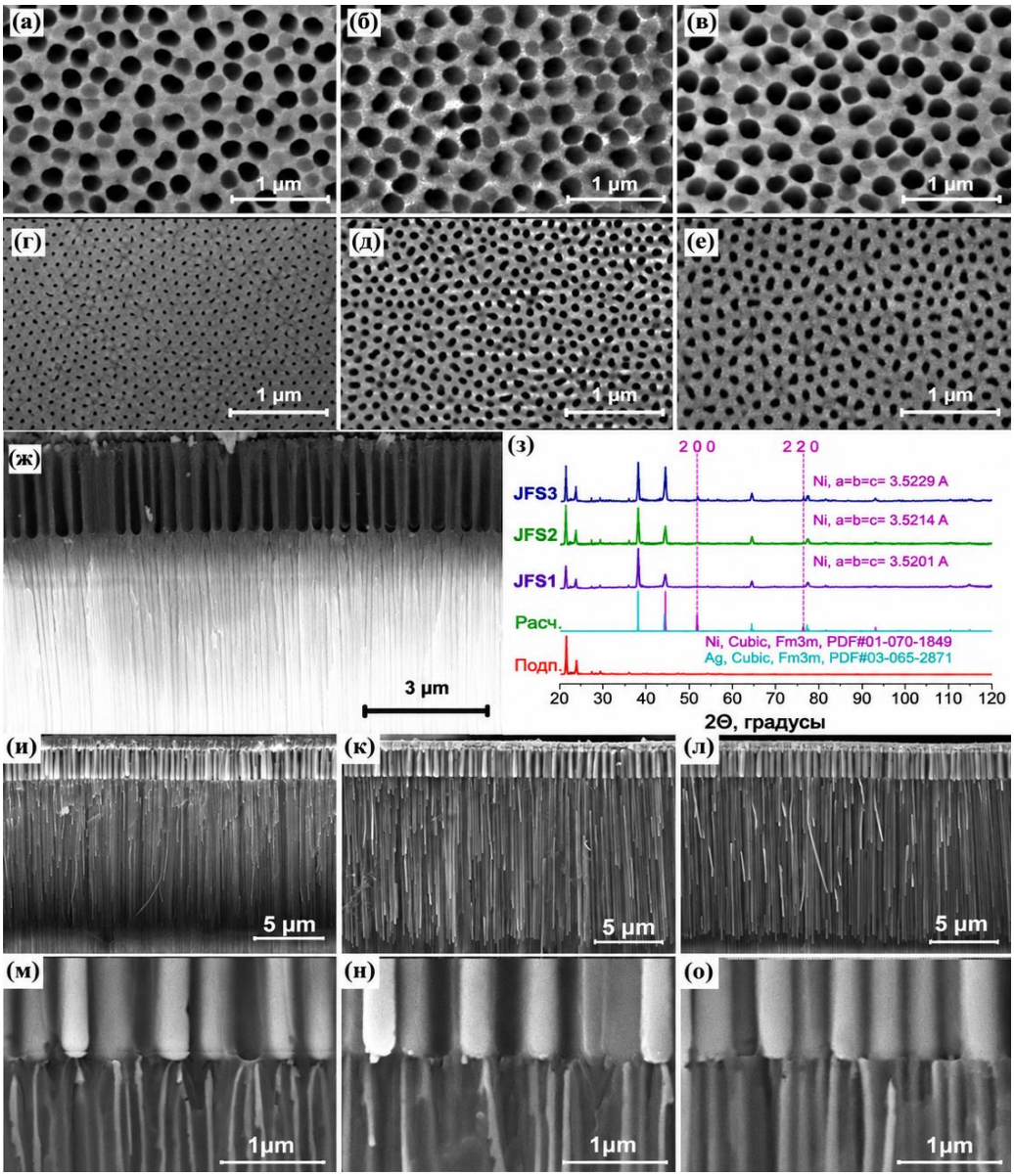


Рисунок 4 – Микроизображения, полученные РЭМ, образцов (а, г, ж) JFS1, (б, д) JFS2 и (в, е) JFS3. (а-в) Лицевые поверхности ДПМА, анодированных при U_1 = 150 В. Обратные поверхности ДПМА, анодированных при (г) U_2 = 50 В, (д) 60 В и (е) 70 В. (ж) Поперечное сечение ДПМА для образца JFS1. (з) Рентгеновские дифрактограммы Ni нанопроволок типа «медуза». РЭМ снимки нанопроволок типа «медуза» на сколе ДПМА: (и), (к) и (л) общий вид, (м), (н) и (о) переходные области между «головами» и «ногами» для образцов (и, м) JFS1, (к, н) JFS2 и (л, о) JFS3

Магнитные свойства массивов нанопроволок типа «медуза», встроенных в ДПМА, исследовали вибрационным магнитометром, измеряя петли гистерезиса при ориентации внешнего поля **H** параллельно и перпендикулярно их длинной оси (рисунок 5 (а-д)). Исследования показали, что ось легкого намагничивания во всех образцах была направлена параллельно длинной оси нанопроволок. При параллельном **H** петли гистерезиса для всех образцов имели уникальную форму с двумя областями разного наклона, что указывало на присутствие двух магнитных фаз с разной анизотропией формы «голов» (диаметр 200–300 нм) и «ног» (диаметр 50–100 нм). С увеличением U_2 форма петли при параллельном поле значимо менялась. Так, коэрцитивная сила H_c линейно уменьшалась: 625 Э для JFS1 (U_2=50 В), 520 Э для JFS2 (60 В) и 397 Э для JFS3 (70 В). Поле насыщения H_{sat}, напротив, возрастало: 2681 Э (JFS1), 2765 Э (JFS2) и 3433 Э (JFS3). Эти изменения сопровождались увеличением наклона петли. Увеличение U_2 приводило к увеличению диаметра «ног» и уменьшению толщины стенок между ними D_{wall}: 65±13 нм (JFS1), 62±19 нм (JFS2) и 52±17 нм (JFS3), что усиливало магнитостатические взаимодействия. Предположительно, слабое взаимодействие было характерно для JFS1, сильное для JFS3, а JFS2 занимал промежуточное положение. При перпендикулярном **H** коэрцитивная сила H_c была значительно меньше: 106 Э (JFS1), 144 Э (JFS2) и 88 Э (JFS3). Поле насыщения H_{sat} составило 3809 Э (JFS1), 4654 Э (JFS2) и 3933 Э (JFS3). Диаграммы FORC, полученные в поле **H**, направленном вдоль длинной оси нанопроволок, выявили детали взаимодействий и распределения коэрцитивных сил (рисунок 5 (е-з)). В образце JFS1 (U_2=50 В) диаграмма показала две обособленные области (A) и (B).

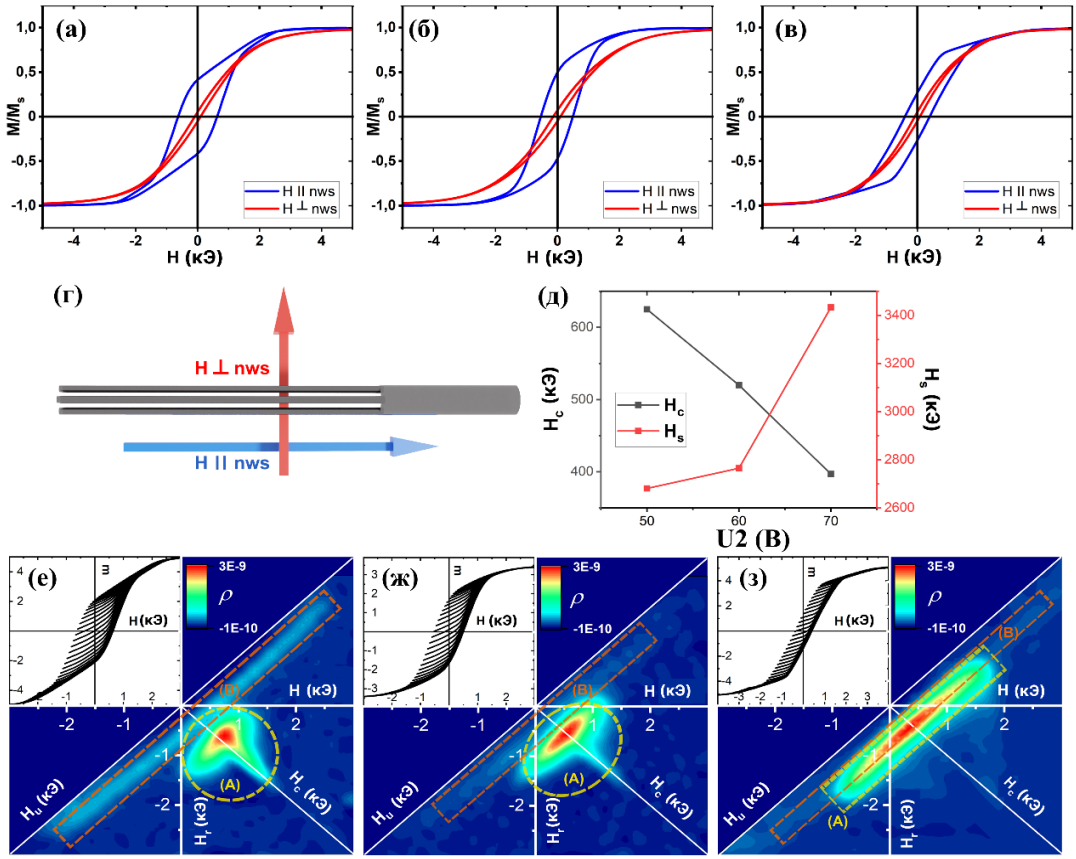


Рисунок 5 – Петли магнитного гистерезиса для образцов (а) JFS1, (б) JFS2 и (в) JFS3 во внешнем магнитном поле **H**, направленном параллельно (синяя линия) и перпендикулярно (красная линия) длинной оси нанопроволок. (г) Зависимость H_c и H_s в **H** параллельном длинной оси нанопроволок типа «медуза» от напряжения второго анодирования U_2 FORC диаграммы для образцов (е) JFS1, (ж) JFS2 и (з) JFS3 в поле **H**, параллельном длинной оси нанопроволок, с областью (A), отмеченной желтой пунктирной линией, и областью (B) – красной

Область (A) FORC-диаграммы, характеризующаяся высокой плотностью переключения ρ, имела форму «ската», типичную для взаимодействующих нанопроволок малого диаметра, и соответствовала перемагничиванию «ног». Для JFS1 поле взаимодействия составляло $H_u^{(A)}$ =1050 Э, а коэрцитивные силы распределялись в диапазоне $H_{cd}^{(A)}$ =500–1200 Э, что указывает на влияние неоднородностей формы и диаметра «ног». Область (B), относимая к «головам», имела меньшую ρ, более широкое распределение по полю взаимодействия $H_u^{(B)}$ =2384 Э и узкий диапазон $H_{cd}^{(B)}$= 245–339 Э, характерный для сильно взаимодействующих структур большого диаметра.

Для JFS2 (U_2=60 В) уменьшение толщины стенок сопровождалось расширением области (A) вдоль H_u и увеличением $H_u^{(A)}$ до 2765 Э, тогда как $H_{cd}^{(A)}$ уменьшилось до 398–747 Э. Область (B) стала значительно слабее вследствие уменьшения относительного объёма материала «голов»; её параметры оценены как $H_{cd}^{(B)}$ =209–300 Э и $H_u^{(B)}$ =2044 Э. В JFS3 (U_2=70 В) характерная форма «ската» исчезла, область (A) стала сильно вытянутой вдоль H_u, при $H_{cd}^{(A)}$ =260–540 Э и $H_u^{(A)}$ =1107 Э. Она сместилась к нулю и частично перекрылась с областью (B), для которой получены $H_{cd}^{(B)}$ =329–397 Э и $H_u^{(B)}$ =3215 Э.

FORC-диаграммы при **H**, перпендикулярном длинной оси нанопроволок, для всех образцов характеризовались плотностью ρ, близкой к уровню шума. Это свидетельствует о практически полном отсутствии необратимых процессов переключения и преобладании обратимых механизмов вращения намагниченности.

Для детального исследования методом АСМ и МСМ (рисунок 6 (а-д)) был выбран JFS3, обладавший наибольшим диаметром «ног», выраженным магнитным откликом и лучшей механической устойчивостью после травления. Нанопроволоки освобождали из ДПМА в смеси 1,8% H_2CrO_4 и 6% H_3PO_4 при 60 °C и исследовали на кремниевой подложке CoCr-кантилевером. В остаточном состоянии МСМ в отсутствие **H** выявила три области выраженного контраста: светлую и тёмную на противоположных концах «головы» и тёмную на конце «ног», что было интерпретировано как проявление магнитных полюсов.

Для интерпретации результатов выполнено микромагнитное моделирование в MuMax^3. Геометрия задавалась по данным РЭМ, размер ячейки составлял 5×5×5 нм³, M_s=500 кА/м, A_{ex}=9 пДж/м. Рассчитанные петли гистерезиса хорошо согласовывались с экспериментальными для всех образцов и обеих ориентаций поля. Для JFS3 распределение поля рассеяния B_{demag} (рисунок 6 (г)) в остаточном состоянии (рисунок 6 (д)) качественно воспроизводило МСМ-контраст (рисунок 6 (в)): магнитный поток от одного полюса «головы» частично замыкался на её противоположном конце и частично – на концах «ног». Такая асимметрия сопровождалась формированием в «голове» конфигурации типа «штопор», тогда как «ноги» сохраняли преимущественно продольную намагниченность.

Для анализа перемагничивания моделировалась одиночная нанопроволока с четырьмя «ногами» в диапазоне H=±5 кЭ с шагом 5 Э. На противоположных концах «головы» зарождались два вихря, разделённые областью продольной намагниченности. При уменьшении поля вихри распространялись к центру. Их киральность могла совпадать, как в JFS1, либо быть противоположной, как в JFS2 и JFS3 (рисунок 6 (е)). В JFS2 при H=−50 Э вихри сближались, а их ядра смещались, формируя конфигурацию типа «штопор» (рисунок 6 (ж)). При H=−100 Э (рисунок 6 (з)) положение её ядра изменялось, а при H=−200 Э (рисунок 6 (и)) «штопор» исчезал с переходом к преимущественно однородной намагниченности вдоль внешнего поля и сохранением концевых вихревых состояний.

Переключение намагниченности в «ногах» исследовалось в динамическом режиме. После насыщения вдоль оси прикладывалось противоположное поле H=−400 Э в течение 20 нс при T=300 К и α=0.5 (рисунок 6 (к-м)). Механизм перемагничивания зависел от диаметра

«ног». В JFS1 формировались медленно движущиеся поперечные доменные стенки, поэтому за 20 нс переключение не завершалось. В JFS2 процесс ускорялся за счёт вихревых доменных стенок, но также оставался незавершённым. В JFS3 полное переключение происходило за 20 нс; вихревые стенки зарождались как на границе с «головой», так и на концах отдельных «ног», что связывается с близостью приложенного поля к их коэрцитивной силе.

Дополнительно моделировалось действие спин-поляризованного тока плотностью j=5 ТА/м² при параллельном поле H=100 Э, знак которого менялся каждые 5 нс в течение 40 нс. В результате формировалась последовательность доменов, разделённых движущимися доменными стенками (рисунок 6н). Их скорости составляли 826 м/с для JFS1, 952 м/с для JFS2 и 570 м/с для JFS3. Полученные результаты показывают потенциальную применимость нанопроволок типа «медуза» в устройствах памяти на «беговых дорожках» (англ. racetrack memory), где «голова» с меньшей коэрцитивностью может служить областью генерации доменных стенок, а «ноги» – каналами их распространения и хранения информации.

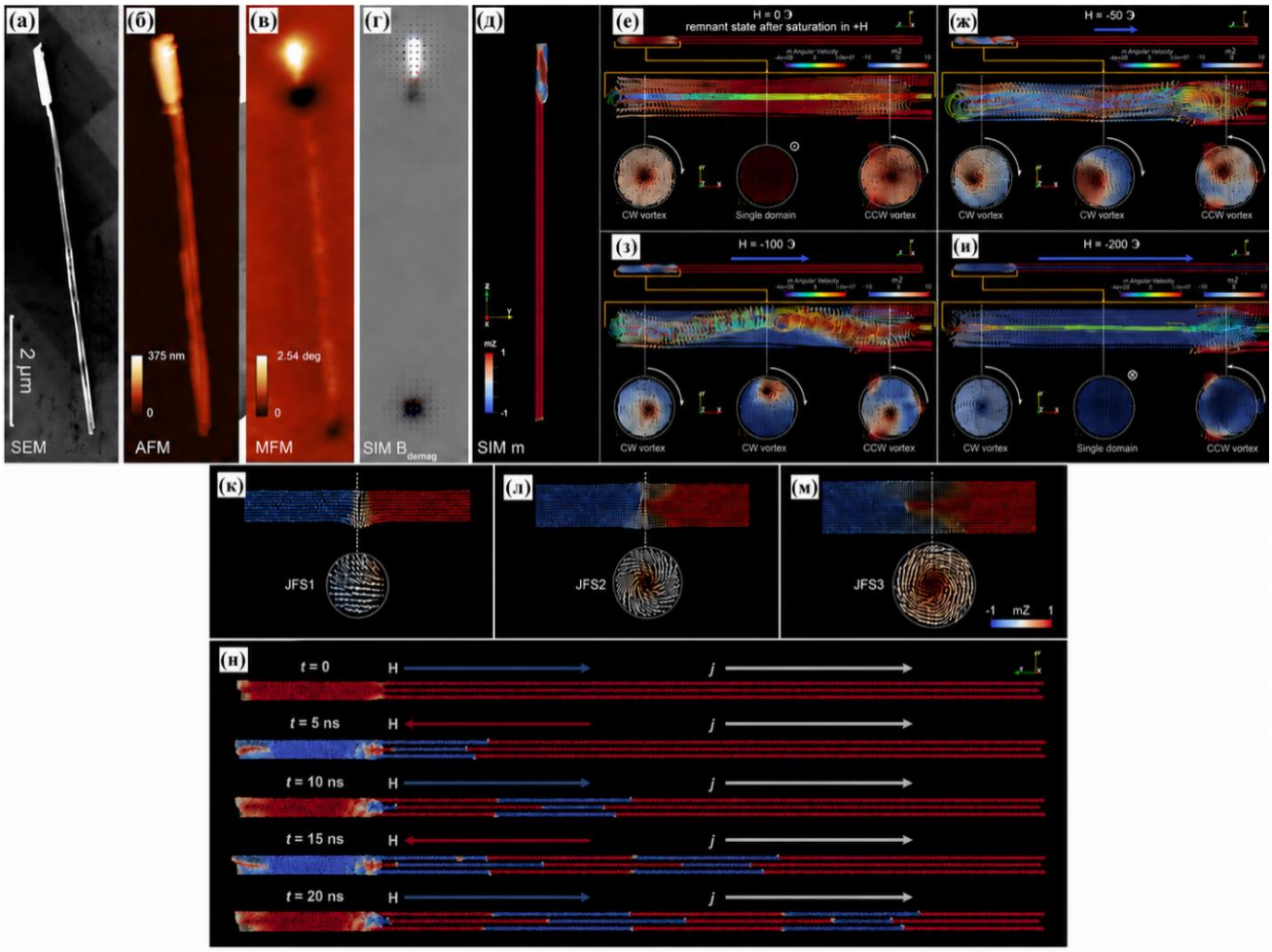


Рисунок 6 – Микроизображения, полученные методами (а) РЭМ, (б) АСМ и (в) МСМ, одиночной нанопроволоки типа «медуза» из образца JFS3. (г) Моделирование магнитостатических полей B_{demag} и (д) соответствующая таким полям конфигурации намагниченности. Моделирование процесса переключения намагниченности при изменении **H** в одиночной нанопроволоке типа «медуза» с параметрами образца JFS2: (е) конфигурация намагниченности в остаточном состоянии после насыщения, и в полях (ж) H = –50 Э, (з) –100 Э и (и) – 200 Э. Стрелки представляют ориентацию намагниченности, закодированную цветом от красного до синего относительно длинной оси нанопроволоки (ось Z). Радужные линии представляют угловую скорость намагниченности в центре нанопроволоки. Типы доменных стенок, наблюдаемых в «ногах»: (к) перпендикулярная доменная стенка в JFS1, (л) вихревая доменная стенка в JFS2 и (м) вихревая доменная стенка в JFS3. (н) Моделирование образования доменных стенок и их движения в образце JFS1 под действием **H**

В пятой главе рассмотрены двухсегментные нанопроволоки типа «медуза» с разными комбинациями Co и Ni сегментов как частный случай сложной комбинации нетривиальной формы и неоднородного состава [A1]. Наноструктуры также были синтезированы с использованием ДПМА, полученных в идентичных условиях для всех образцов, аналогичных описанным в главе 4 для образца JFS3.

Благодаря обнаруженному в главе 4 моменту заполнения «голов» осаждаемым материалом, проявляющему себя как переходная область между двумя плато зависимости тока от времени электроосаждения, появилась возможность точного контроля материала в «головах» и «ногах» полученных наноструктур. Таким образом двухсегментные Co/Ni нанопроволоки типа «медуза» были синтезированы осаждением Co в верхний слой ДПМА в течение 26 минут при U = 0,6 В для получения Co «голов», а затем во второй слой ДПМА осаждался Ni в течение 200 минут при U = 0,9 В для получения «ног» соответствующего состава. В свою очередь двухсегментные нанопроволоки Ni/Co типа «медуза» получали осаждением Ni «голов» в течение 75 минут при U = 0,9 В, а затем Co «ног» в течение 30 минут при U = 0,6 В. В качестве одного из референсных образцов были также получены Co нанопроволоки типа «медуза» в течение 70 минут при U = 0,6 В. Анализ снимка РЭМ на сколе ДПМА показал, что средний диаметр для «голов» среди образцов составил D_{heads} = 290±16 нм, для ног D_{legs} = 97±7 нм. Средняя длина «голов» составила l_{heads} = 2,0±0,04 мкм, средняя длина «ног» l_{legs} = 10,7±0,38 мкм. Результаты анализа элементного состава картированием ЭДРС представлены на рисунке 7. Поскольку контроль осаждаемого материала осуществлялся на основе зависимости тока от времени во время электроосаждения, удалось добиться равномерного заполнения пор в соответствующих слоях соответствующими материалами. Применение двухванного метода позволило получить сегменты Co и Ni в чистом виде, без образования сплава CoNi.

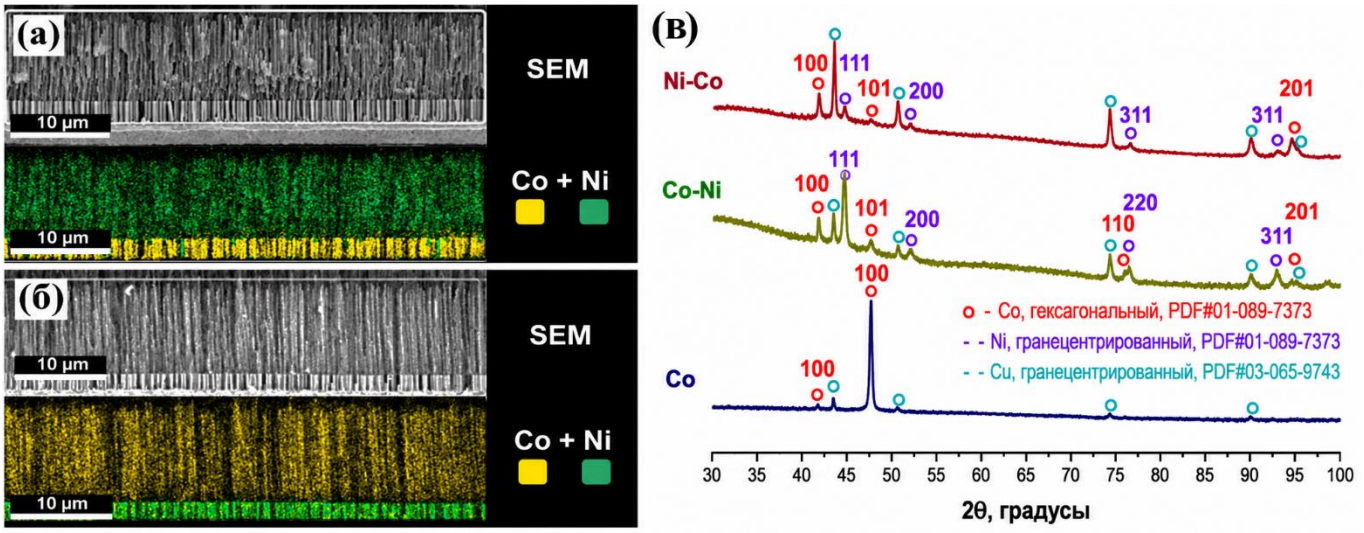


Рисунок 7 – Микроизображения, полученные РЭМ, и результат картирования ЭДРС массивов (а) Co/Ni, (б) Ni/Co нанопроволок типа «медуза» на сколе ДПМА. (в) Рентгеновские дифратограммы Co, Co/Ni, Ni/Co нанопроволок типа «медуза»

Результаты анализа кристаллической структуры (рисунок 7 (в)) методом рентгеновской дифракции показали, что все образцы имеют поликристаллическую структуру, Co представлен ГПУ фазой, а Ni гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой. Анализ относительных интенсивностей отражений позволил предположить, что Co во всех образцах текстурирован, как и в 3 главе данной работы, тогда как Ni явной предпочтительной ориентации не демонстрирует. Средний размер зерен, рассчитанный по формуле Шеррера, составил 40 нм для Co и 25 нм для Ni.

Магнитные свойства массивов Co/Ni, Ni/Co и гомогенных Co-нанопроволок, встроенных в ДПМА, исследовали методом вибрационной магнитометрии при **H**, направленном параллельно и перпендикулярно длинной оси нанопроволок. Для сравнения использовали данные Ni-нанопроволок типа «медуза» JFS3 из главы 4. Полученные петли гистерезиса имели характерную форму для каждого образца. Для Ni (рисунок 8 (г)) при параллельном **H** наблюдалась типичная петля для нанопроволок с преобладающей анизотропией формы; её наклон обусловлен сильными магнитостатическими взаимодействиями. Для Co (рисунок 8 (а)) петли при двух ориентациях **H** были наиболее близкими по форме, что указывает на низкую эффективную анизотропию и может быть связано с конкуренцией анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии текстурированного ГПУ-Co; при этом ось лёгкого намагничивания сохранялась преимущественно вдоль нанопроволок.

Для двухсегментных Co/Ni-нанопроволок типа «медуза» (рисунок 8 (б)) петля при параллельном H имела гибридный характер, сочетая признаки лёгкого и трудного направлений. Один вклад насыщался при H_{sat}=1,6 кЭ и предположительно соответствовал Ni-«ногам» с продольной анизотропией формы. Второй насыщался при H_{sat}=14 кЭ, что превышало H_{sat}=11 кЭ в поперечном поле и указывало на возможное доминирование в Co-«головах» магнитокристаллической анизотропии с лёгкой осью, ориентированной поперёк нанопроволок. Для Ni/Co (рисунок 8 (в)) наблюдалась типичная для одномерных структур петля с лёгкой осью вдоль нанопроволок, что свидетельствует о преобладании анизотропии формы как в Ni-«головах», так и в Co-«ногах».

FORC-диаграммы, полученные при H, параллельном длинной оси, представлены на рисунке 8 (д-з); для сравнения использовали данные однородного Ni-образца из главы 4. Для Co и Ni/Co (рисунок 8 (д, ж)) наблюдалась форма «ската» с широким распределением локальной коэрцитивной силы H_{cd}: верхняя граница достигала около 1 кЭ, нижняя начиналась от H_{cd}=0 Э. Для Co/Ni и Ni (рисунок 8 (е, з)) распределение было более однородным, а нижняя граница H_{cd} составляла 265 Э. Широкий разброс H_{cd} в образцах с Co-«ногами» связывается с распределением направлений магнитокристаллической анизотропии поликристаллического ГПУ-Co, формирующим области с различной локальной коэрцитивностью. Более узкое распределение H_{cd} в образцах с Ni-«ногами» соответствует слабому вкладу магнитокристаллической анизотропии и большей однородности геометрических параметров.

Все образцы с Co имели схожий диапазон полей взаимодействия H_u, значительно меньший (H_u = 634–734 Э), чем у однородного Ni образца (H_u = 1090 Э). Это указывает, что введение Co снижает интенсивность магнитостатических взаимодействий, несмотря на более высокую намагниченность насыщения Co ($M_s \approx$ 1400 кА/м) по сравнению с Ni ($M_s \approx$ 490 кА/м). Это снижение интенсивности взаимодействий при введении Co может быть обусловлено двумя факторами. Во-первых, в Co «ногах», где диаметр ~100 нм, размер зерна 40 нм, формируется сложная доменная структура. Случайные ориентации *c*-осей зерен Co в плоскости, перпендикулярной оси нанопроволоки, могут способствовать замыканию магнитного потока внутри её объема, тем самым уменьшая магнитостатическое взаимодействие с соседними структурами. В главе 3 наблюдался противоположный эффект, когда в нанопроволоках с значительно меньшим диаметром (40 нм в главе 3 против 100 нм в данной главе) и со схожим текстурированием магнитостатические взаимодействия были значительно выше по сравнению с Ni и Fe образцами, ввиду того что на перпендикулярном срезе нанопроволок умещалось лишь 1-2 зерна, что приводило к локальному развороту намагниченности перпендикулярно проволок и выходу магнитного потока за пределы наноструктуры. Во-вторых, в Co «головах» с низкой анизотропией формы, где эффективная

анизотропия направлена перпендикулярно длинной оси, могут преобладать обратимые механизмы перемагничивания, такие как когерентное вращение. Поскольку метод FORC-диаграмм регистрирует только необратимые процессы, связанные с движением доменных стенок, магнитостатические взаимодействия между такими «головами» становятся для него неразличимы. В FORC-диаграмме для образца Ni/Co, помимо основного распределения, наблюдается также очень слабое, но широкое распределение по оси H_u, которое, аналогично результатам главы 4, можно отнести к взаимодействиям между Ni «головами».

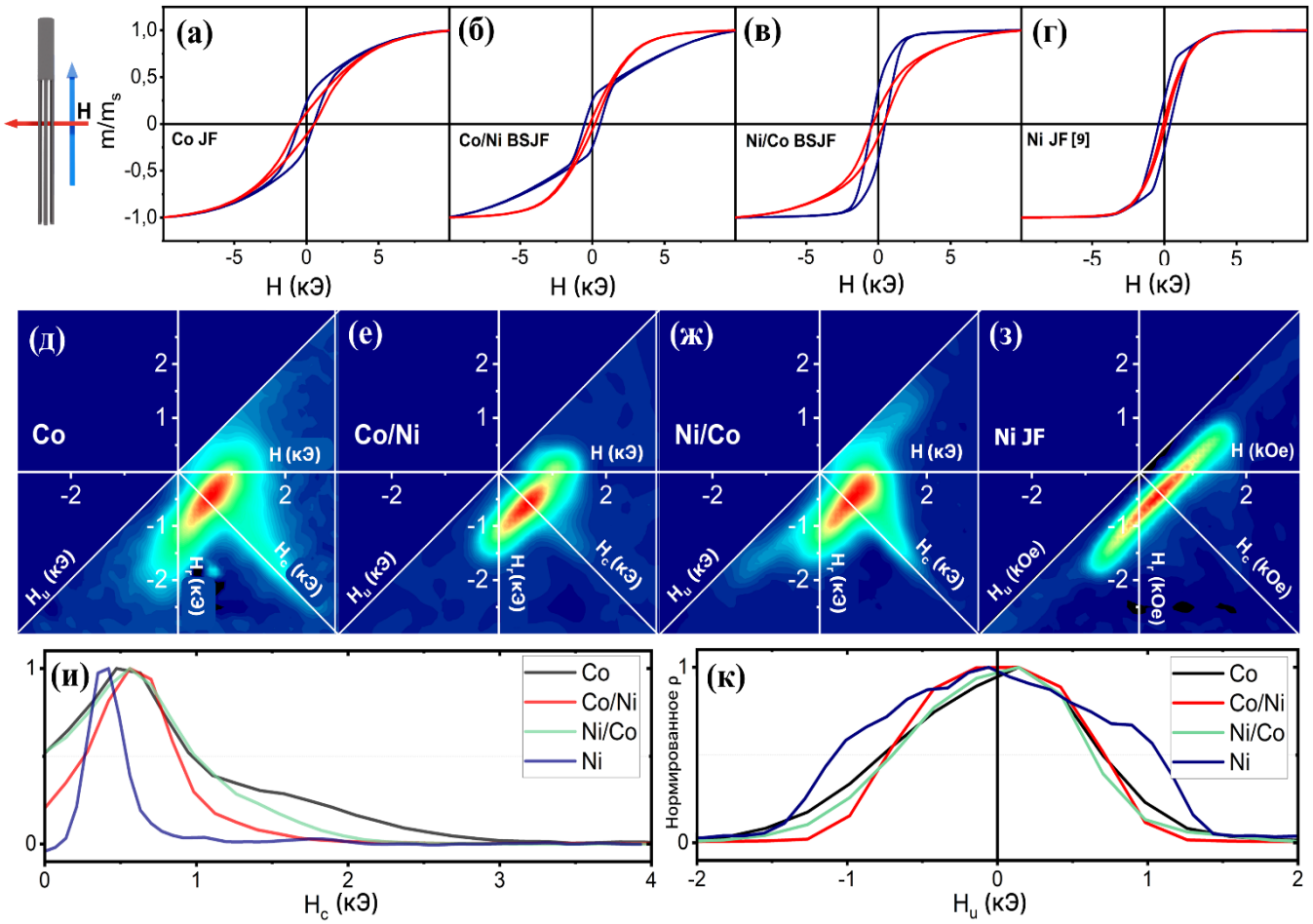


Рисунок 8 – Петли магнитного гистерезиса массивов нанопроволок типа «медуза» (а) Co, (б) Co/Ni и (в) Ni/Co, (г) Ni (JFS 3 из главы 4) встроенных в пористую двухслойную матрицу оксида алюминия в направлении **H**, параллельном (синяя линия) и перпендикулярном (красная линия) длинной стороны нанопроволок. FORC-диаграммы для (д) Co, (е) Co/Ni, (ж) Ni/Co и (з) Ni нанопроволок типа «медуза» в направлении **H**, параллельном длинной оси нанопроволок. Профили распределения FORC по осям (и) H_c и (к) H_u

Анализ МСМ одиночных нанопроволок типа «медуза», вытравленных из ДПМА, показал кардинальное различие в распределении полей рассеивания между Co и Ni нанопроволоками (рисунок 9). Ni нанопроволока, как описано в главе 4, характеризуется тремя областями сильного магнитного потока. Одним массивным белым полюсом на конце «головы», одним черным полюсом на противоположном конце «головы» и еще одним черным полюсом на конце «ног». В отличие от этого, Co нанопроволока демонстрирует очень слабый магнитный отклик без образования полюсов, сопоставимых по интенсивности с Ni.

Однако на изображении Co нанопроволоки (рисунок 9(г)) в «голове» и «ногах» виден слабый магнитный контраст, что может указывать на наличие сложной доменной структуры, обусловленной комбинацией анизотропии формы и магнитокристаллической

анизотропии. Эти данные подтверждают гипотезу о преимущественном замыкании магнитного потока внутри объема Co сегментов. Для более детального анализа влияния комбинации магнитокристаллической анизотропии и нетривиальной анизотропии формы на магнитное поведение и подтверждения высказанных выше гипотез проводилось микромагнитное моделирование в MuMax[3]. Как и в предыдущих главах, достоверность построенной модели подтверждалась сравнением экспериментальных и смоделированных для массива нанопроволок петель гистерезиса в обоих ориентациях **H**.

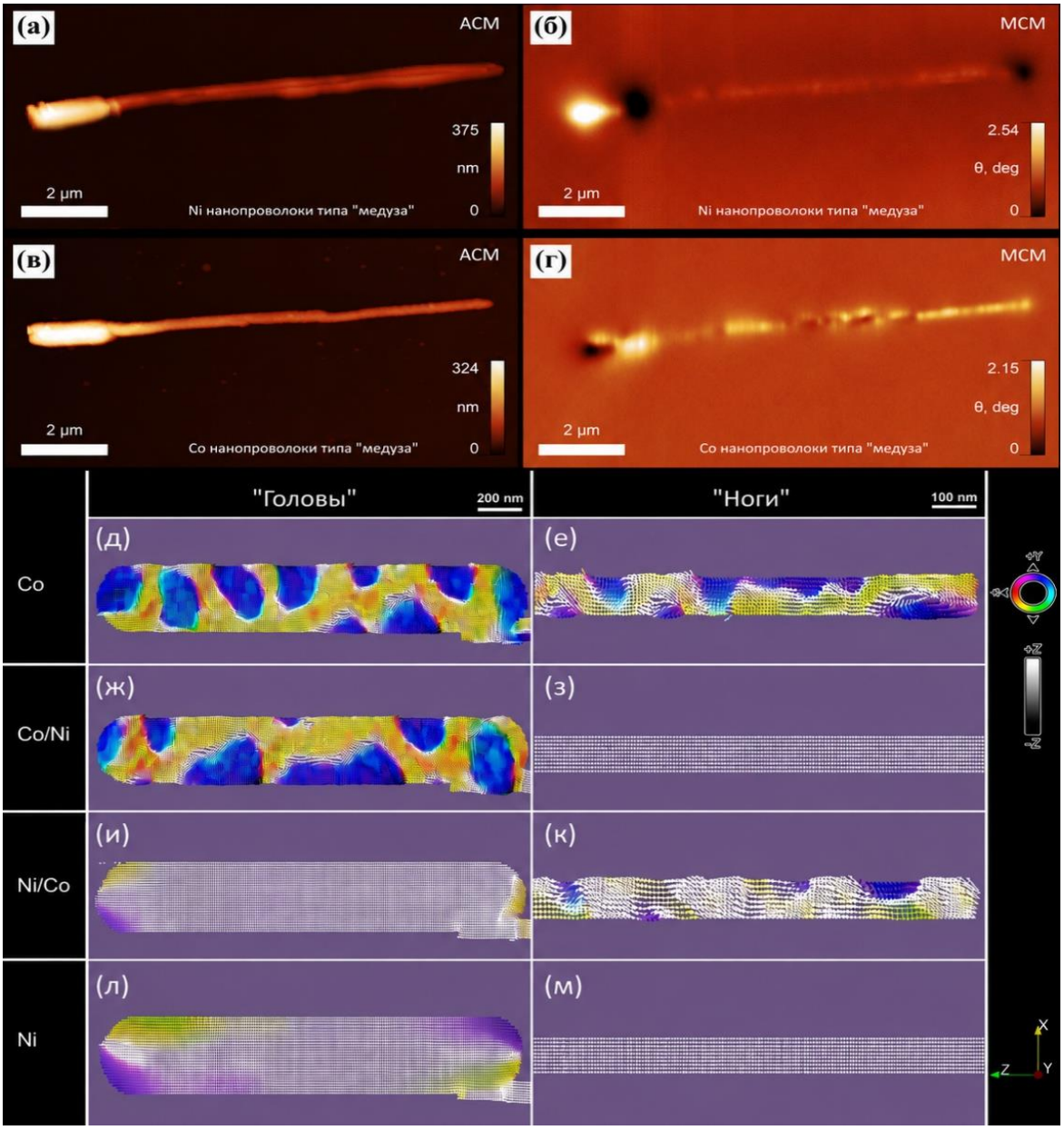


Рисунок 9 – Микроизображения, полученные методами ACM и MCM, для (а, б) Ni и (в, г) Co нанопроволок типа «медуза». Конфигурации намагниченности (кодированные с использованием цветовой модели — тон, насыщенность, яркость) в центральном сечении отдельных «голов» (д, ж, и, л) и «ножек» (е, з, к, м) нанопроволок типа «медуза» (д, е) Co, (ж, з) Co/Ni, (и, к) Ni/Co и (л, м) Ni

Моделирование микромагнитной конфигурации отдельных нанопроволок представлено на рисунке 9 (д-м). Визуализация векторов намагниченности **M** и её угловой скорости в остаточном состоянии после насыщения в параллельном **H** показала, что доменная структура сегментов Co и Ni схожа в разных образцах, что указывает на незначительное влияние состава соседних сегментов.

Как показало моделирование, Co «головы» в Co и Co/Ni нанопроволоках имели сложную многодоменную структуру, искаженную магнитокристаллической анизотропией зерен, с **M**, ориентированной преимущественно перпендикулярно длинной оси, и тенденцией к замыканию магнитного потока внутри своего объема. Ni «головы» в Ni и Ni/Co нанопроволоках имели однодоменную конфигурацию с концевыми вихревыми доменами. Co «ноги» в Co и Ni/Co нанопроволоках содержали набор последовательных вихрей разной киральности с доменными границами, искаженными анизотропией зерен, что указывает на слабое преобладание анизотропии формы над магнитокристаллической анизотропией. Конфигурация «штопор», наблюдавшаяся в «головах» Ni нанопроволок в главе 4, в Ni/Co нанопроволоках отсутствовала, что характеризует её как результат специфических взаимодействий между «головами» и «ногами». В Ni/Co нанопроволоках конфигурация **M** в «ногах» похожа на таковую в Co нанопроволоках, но с меньшим периодом доменных стенок, большим количеством вихрей и границ, что может быть следствием магнитостатического влияния Ni «голов».

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Установлено, что магнитные свойства нанопроволок Fe и Ni определяются анизотропией формы, а Co магнитокристаллической анизотропией, что приводит к изотропному поведению и намагниченности, перпендикулярной оси проволок, усиливая взаимодействия в массиве. Разброс длин в массивах Fe нанопроволок ослабляет магнитостатические взаимодействия. Разработан синтез градиентных Co–CoW нанопроволок. Легирование позволяет изменять структуру от ГПУ-фазы Co до аморфного CoW, управляя вкладом анизотропий. Ось лёгкого намагничивания при этом перпендикулярна оси нанопроволок, что подтверждает управление эффективной анизотропией через кристаллическую структуру.

2. Разработан метод синтеза двухслойных пористых матриц для получения Ni нанопроволок типа «медуза» с разными диаметрами «голов» и «ног», что обеспечивает их индивидуальные магнитные характеристики и двухступенчатое перемагничивание. Ось лёгкого намагничивания совпадает с осью нанопроволок, подтверждая доминирование анизотропии формы. Микромагнитное моделирование выявило конфигурацию «штопор» и движение доменных стенок в «ногах», перспективные для памяти «на беговой дорожке». Результаты подтверждают управление магнитным поведением через геометрию.

3. Созданы двухсегментные Co/Ni и Ni/Co нанопроволоки типа «медуза». Установлено, что в Co «головах» доминирует магнитокристаллическая анизотропия, а в Co «ногах» анизотропия формы. Сегменты Co формируют сложную доменную структуру, замыкающую магнитный поток внутри и снижающую магнитостатические взаимодействия в массивах. Комбинирование разных типов анизотропии в одной нанопроволоке позволяет точно настраивать её магнитное поведение и управлять межструктурными взаимодействиями.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. **Sobirov M. I.**, Rogachev K. A., Bazrov M. A., Namsaraev Zh. Zh., Sapovskii I. M., Rakhmatullaev T. R., Ilin N. V., Lembikov A. O., Pisarev S. M., Ognev A. V., Samardak A.S., Samardak A.Yu. Magnetic duality and composition engineered magnetoresistance in bisegmented Co–Ni jellyfish nanowires via anisotropy engineering // Materials Today Nano. – 2026. – Vol. 35. – P. 100939. – DOI: 10.1016/j.mtnano.2026.100939. – Q1 Scopus/WoS.

A2. **Sobirov M.I.**, Rakhmatullaev T.R., Sapovskii I.M., Ilin N.V., Tarasov E.V., Lembikov A.O., Pisarev S.M., Rogachev K.A., Samardak A.S., Ognev A.V., Komogortsev S.V., Tkachenko I.A., Samardak A.Yu. Tuning magnetic anisotropy from uniaxial to easy plane via composition gradient in electrodeposited Co–CoW nanowires // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2026. – Vol. 39. – P. 34. – DOI: 10.1007/s10948-025-07102-7. – Q3 Scopus/WoS.

A3. **Sobirov M.I.**, Samardak A.Yu., Satsuk S.A., Rogachev K.A., Ognev N.A., Leyko G.A., Lembikov A.O., Pisarev S.M., Komogortsev S.V., Ognev A.V., Samardak A.S. Effect of nonuniform morphology and crystalline structure on the effective magnetic anisotropy in Fe, Co, and Ni nanowire arrays // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2025. – Vol. 38. – P. 41. – DOI: 10.1007/s10948-024-06890-8. – Q3 Scopus/WoS.

A4. Samardak A.Yu., **Sobirov M.I.**, Rogachev K.A., Shishelov A.F., Lembikov A.O., Ognev N.A., Leyko G.A., Ognev A.V., Samardak A.S. Fabrication and magnetic behavior of jellyfish like Ni nanowires synthesized using bilayered nanoporous anodic alumina templates // Small. – 2024. – Vol. 20, No. 36. – P. e2401270. – DOI: 10.1002/smll.202401270. – Q1 Scopus/WoS.

Тезисы докладов на научных конференциях по теме диссертации:

1. **Sobirov M.I.**, Samardak A.Yu., Rakhmatullaev T.R., Sapovskii I.M., Rogachev K.A., Zhukov D.A., Samardak A.S. Magnetization reversal and response in bisegmented Co/Ni jellyfish nanowires // Samarkand International Symposium on Magnetism (SISM-2026): Book of Abstracts. – Samarkand, 2026. – P. 122.
2. **Sobirov M.I.**, Rogachev K.A., Rakhmatullaev T.R., Sapovskii I.M., Ilin N.V., Samardak A.S., Samardak A.Yu. Fundamental magnetic behavior and segment-dependent reversal processes in compositionally segmented Co/Ni/Co nanowires // 2026 International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2026): Abstract e-Book. – Busan, Korea, 2026. – P. 459.
3. **Sobirov M.I.**, Samardak A.Yu., Rakhmatullaev T.R., Sapovskii I.M., Rogachev K.A., Ognev N.A., Zhukov D.A., Ognev A.V., Samardak A.S. Synthesis and magnetic properties of segmented Co/Ni jellyfish nanowires // IX Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2025) Abstracts. – Yuzhno-Sakhalinsk: Editorial and publishing center, Sakhalin State University, 2025. – С. 424–425. – ISBN 978-5-88811-673-9.
4. Sobirov M.I., Sapovskii I.M., Rakhmatullaev T.R., Rogachev K.A., Ilin N.V., Samardak A.Yu. Comparative study of influence of shape and crystalline structure on magnetic properties and domain structure of Fe, Co and Ni nanowire arrays // 7th International Conference of the Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2025): Web Abstract Book. – Okinawa, Japan, 2025. – P. 280.
5. **Собиров М.И.**, Самардак А.Ю., Огнев Н.А., Лейко Г.А., Огнев А.В., Самардак А.С. Магнитные свойства нанопроволок Ni, Fe, Co, синтезированных с использованием пористых матриц Al_2O_3 // Новое в магнетизме и магнитных материалах: сборник трудов XXV Международной конференции, Москва, 1–5 июля 2024 г. – Москва: РТУ МИРЭА, 2024.– С. 187–189.– ISBN 978-5-4465-1869-2.
6. **Sobirov M.I.**, Samardak A.Yu., Rogachev K.A., Ognev N.A., Leiko G.A., Samardak A.S., Ognev A.V. Synthesis and magnetic properties of Ni, Fe, Co nanowire, produced by electrochemical deposition method // The 5th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2024): Book of Abstracts. – 2024. – P. 309.

7. **Собиров М.И.**, Самардак А.Ю., Рогачев К.А., Шишелов А.Ф., Огнев Н.А., Лейко Г.А., Самардак А.С., Огнев А.В. Магнитные свойства нанопроволок Co типа «медуза» // Молодежная Школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024) : сборник тезисов докладов, 11–15 марта 2024 г., пос. Лосево, Ленинградская область. – Гатчина: НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2024. – С. 95.
8. Samardak A.Yu., **Sobirov M.I**., Ognev N.A., Leiko G.A., Samardak A.S., Ognev A.V. Shape-driven magnetic properties of jellyfish-like Ni nanowires // Samarkand International Symposium on Magnetism (SISM-2023): Book of Abstracts. – Samarkand, 2023. – P. 118. – ISBN 978-5-00202-320-2.
9. **Sobirov M.I.**, Samardak A.Yu., Azon S.A., Potapova S.R., Karibov M.B., Samardak A.S., Ognev A.V. Magnetic properties of Ni nanowires synthesized using templates with different pore order // VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2022): Book of Abstracts. – Vol. I. – Kazan, 2022. – P. 179–180. – ISBN 978-5-94469-051-7.
10. **Sobirov M.I.**, Samardak A.Yu., Azon S.A., Samardak A.S., Ognev A.V. Synthesis and magnetic properties of electrodeposited Ni nanowires with a high aspect ratio // Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 2022): Proceedings. – Vladivostok: Dalnauka, 2022. – P. 170–171. – ISBN 987-5-8044-1716-2.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Complex Three-Dimensional Magnetic Ordering in Segmented Nanowire Arrays / Grutter A. J. et al. // ACS Nano. – 2017. – Vol. 11, No. 8. – P. 8311–8319.
2. Internalization of ferromagnetic nanowires by different living cells / Prina-Mello A., Diao Z., Coey J. // J Nanobiotechnology. – 2006. – Vol. 4, No. 1. – P. 9.
3. Artificial control of layer thickness in Co-Pt alloy multilayer nanowires fabricated by dual-bath electrodeposition in nanoporous polycarbonate membranes / Kawana R. et al. // Applied Physics Express. – 2025. – Vol. 18, No. 3. – P. 033002.
4. Reliability of NAND Flash Memories: Planar Cells and Emerging Issues in 3D Devices / Spinelli A., Compagnoni C., Lacaita A. // Computers. – 2017. – Vol. 6, No. 2. – P. 16.
5. Three-dimensional nanomagnetism / Fernández-Pacheco A. et al. // Nat Commun. – 2017. – Vol. 8, No. 1. – P. 15756.
6. Cylindrical Magnetic Nanowires Applications / Moreno J. A. et al. // IEEE Trans Magn. – 2021. – Vol. 57, No. 4. – P. 1–17.
7. Photothermal and magnetic studies of Ni@Au nanotubes for anti-cancer therapies / Anikin A. et al. // Modern Electronic Materials. – 2025. – Vol. 11, No. 2. – P. 81–91.
8. Magnetization reversal of ferromagnetic nanosprings affected by helical shape / Nam D. Y. et al. // Nanoscale. – 2018. – Vol. 10, No. 43. – P. 20405–20413.
9. Magnetization pinning in modulated nanowires: from topological protection to the “corkscrew” mechanism/ Fernandez-Roldan J. A. et al. // Nanoscale. – 2018. – Vol. 10, No. 13. – P. 5923–5927.
10. Magnetic anisotropy in ordered textured Co / L. G. Vivas, J. Escrig, D. G. Trabada, G. A. Badini-Confalonieri, M. Vázquez // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 100, No. 25. – P. 252405.
11. Effects of pH on the crystallographic structure and magnetic properties of electrodeposited cobalt nanowires / Zafar N. et al. // J Magn Magn Mater. – 2015. – Vol. 377. – P. 215–219.
12. Influence of the electrodeposition potential on the crystallographic structure and effective magnetic easy axis of cobalt nanowires/ Irshad M. I. et al. // RSC Adv. – 2016. – Vol. 6, No. 17. – P. 14266–14272.

Собиров Мухаммад Илхомиддинович

Влияние конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных 3d металлов

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 00.00.0000
Формат 60×84/16. Усл. Печ. Л. 1,39.
Тираж 130 экз. Заказ

Отпечатано в типографии
Издательства ДВФУ
690990, Владивосток, ул. Пушкинская, 10