

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА"

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

МЕТОДЫ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО СПИНОВОГО ЛЬДА

Выполнил
студент 419 группы
Шабает Д. Ф.

Допущен к защите _____

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

Научный руководитель:
к. ф.-м. н. А. В. Четвертухин.

Москва, 2022

Содержание

1	Введение	4
1.1	Важность экспериментальной разработки спинового льда	4
1.2	Цель работы и постановка задач	4
2	Литературный обзор	6
2.1	Искусственный спиновый лед	6
2.1.1	Геометрически фрустрированные магниты	6
2.1.2	Магнитный монополь	7
2.2	Нейронные сети Хопфилда, эмулированные с помощью спиновых систем	8
2.3	Аддитивные технологии	9
2.3.1	Проекционная микростереолитография – P μ SL (Projection Microstereolithography)	9
2.3.2	Двухфотонная полимеризация (2PP)	10
3	Подготовка к эксперименту	12
3.1	Выбор материала для изготовления (пермаллоя и полимера). Критерий однодоменности	13
3.2	Влияние соседних магнитных моментов друг на друга для переключения	15
3.3	Реализация однодоменных полосок	15
3.4	3D-модели экспериментальных образцов	16
4	Изготовление экспериментальных образцов	18
4.1	Описание процесса печати	18
4.2	Методика экспериментов	20
4.3	Термическое осаждение	21
4.4	Анализ химического состава	22

4.5	Керр-микроскоп-магнитометр	24
4.6	Полученная доменная структура	26
5	Результаты измерений и выводы	28
6	Список литературы	29

1 Введение

1.1 Важность экспериментальной разработки спинового льда

Недавние успехи в методах нанопроизводства сделали возможным изучение магнетизма в малом масштабе, в котором могут быть потенциальные приложения для записи с высокой плотностью записи и современных магнитоэлектронных устройств [1]. Изучение процессов перемагничивания в микро- и наноструктурных ферромагнитных системах в настоящее время привлекают внимание как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Прогресс в науке и технике зависит от решения сложных задач оптимизации в больших масштабах. Это требует разработки специального вычислительного оборудования для решения задач, сложности которых возрастают. Основная задача оптимизации при помощи спинового льда - нахождение низкоэнергетических состояний в спиновых системах с полностью случайными взаимодействиями. Работа посвящена различным экспериментальным методам создания искусственного спинового льда, пригодных для дальнейшего использования в решениях задач оптимизации

1.2 Цель работы и постановка задач

Целью настоящей работы является изучение возможности создания искусственного спинового льда методом 3D-микрорепетиции. В перечень задач входят:

1. Выбор и поиск структуры искусственного спинового льда для 3D-печати.
2. Выбор технологии для 3D-печати основы структуры спинового льда.
3. Выбор необходимого материала для напыления с учётом характерных размеров предложенной трехмерной структуры основы.

4. Создание модели и 3D-печать элементов полимерной основы искусственного спинового льда.
5. Напыление функционального материала на тестовую основу с отработкой режимов и анализом химического состава для проверки пригодности в качестве материала для спинового льда.
6. Изучение магнитных свойств и доменной структуры напыленных образцов функционального материала для структур искусственного спинового льда.

2 Литературный обзор

2.1 Искусственный спиновый лед

Искусственный спиновый лед – это ферро- или ферримагнитная структура, в котором атомные магнитные моменты структурированы на регулярной решетке тетраэдров [2]. Характерной чертой спинового льда является остаточная энтропия, что также является характерным для обыкновенного кристаллического льда. Из-за остаточной энтропии спиновый лед является геометрически фрустрированной (не имеющей однозначного равновесного положения) системой. Эта система интересна тем, что при определенной геометрии решетки в ней может возникнуть искусственный магнитный монополю [3].

2.1.1 Геометрически фрустрированные магниты

Это материалы, в которых размещение магнитных моментов и возникающая фрустрация взаимодействий влияют на коллективное поведение, создавая необычные физические явления [4]. Наиболее изученными материалами являются спиновый лед и спиновые стекла. На рис.1 изображен пример фрустрации в антиферромагнетике. Геометрическая магнитная фрустрация возникает из-за геометрии упорядоченной структуры, в которой взаимодействия между парами магнитных моментов не могут быть полностью скомпенсированы [4]. Это явление естественным образом возникает в материалах пироклорного спинового льда, которые имеют ту же геометрическую структуру, что и положения ионов водорода в замерзшем льде [5].

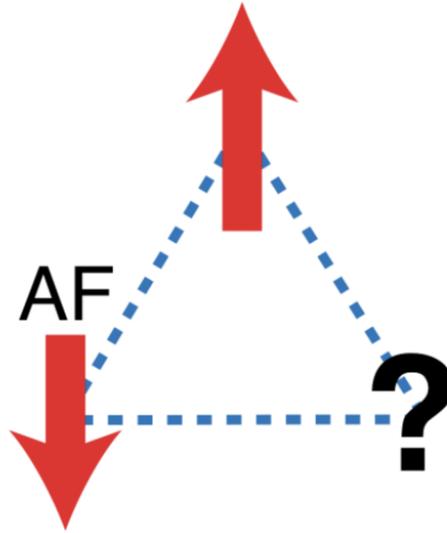


Рис. 1. Схема фрустрации в антиферромагнетике. Стрелки - направления магнитных моментов, линии - взаимное расположение ионов.

2.1.2 Магнитный монополюль

Магнитный монополюль – гипотетическая частица, представляющая собой магнит с одним магнитным полюсом. В некоторых системах конденсированного состояния вещества, к примеру в спиновом льду [6], бывают эффекты, схожие с магнитными монополюлями. Перемещение искусственных магнитных монополюлей из-за фрустрации соответствует поиску низкоэнергетического состояния системы. На рис.2 изображен пример возникновения магнитного монополюля с зарядом $+2Q$ на стыке двух магнитных моментов. Стрелками указаны направления магнитных моментов.

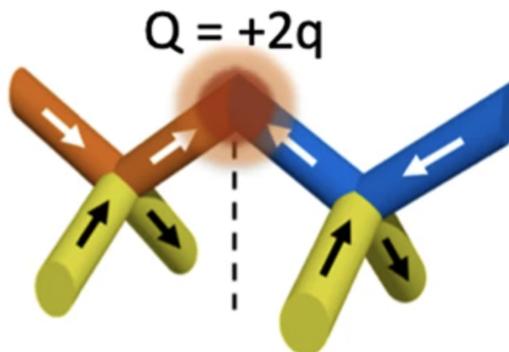


Рис. 2. Из [6]. Пример возникновения магнитного монополюля с зарядом $+2Q$ на стыке двух магнитных моментов.

Магнитный монополю обладает возможностью перемещаться, причем система искусственного спинового льда стремится к состоянию, соответствующему локальному энергетическому минимуму. Это свойство спинового льда можно использовать для аналогового решения задач оптимизации или распознавания, например, при помощи эмуляции нейронной сети. В частности, реализации вычислителя, работающего по принципу нейронной сети Хопфилда [7].

2.2 Нейронные сети Хопфилда, эмулированные с помощью спиновых систем

Нейронная сеть Хопфилда – полносвязная нейронная сеть, позволяющая решать задачи распознавания и оптимизации путем нахождения локальных минимумов. Полносвязная нейронная сеть - это сеть, в которой каждый нейрон связан со всеми соседними нейронами. Математически, обучение нейронных сетей является задачей оптимизации выходных данных по входным данным [8]. Алгоритм работает следующим образом: имеется несколько эталонов изображения, например, банковской купюры, чем больше эталонов, тем точнее распознавание. Каждое изображение купюры является локальным положением равновесия. При анализе купюры неизвестной номинальной стоимости, система релаксирует к одному из положений равновесия. Математически, это можно описать как произведение вектора входных данных на матрицу. Если система пришла в положение равновесия, значит купюра распознана и принимается. В случае, если такого положения равновесия не нашлось, купюра не распознана и не принимается. Это называется ассоциативной памятью. В одном из последних исследований [7] показано, что некоторые спиновые системы, подчиняющихся модели Изинга (магнитный момент имеет только 2 возможных направления, чаще всего, эти направления коллинеарны), например, спиновое стекло, обладают ассоциативной памятью, с их помощью можно реализовать нейронную сеть Хопфилда на

практике. Подобные структуры тяжело реализуемы стандартными методами изготовления. Для этого могут быть использованы развивающиеся аддитивные технологии.

2.3 Аддитивные технологии

Аддитивные технологии – технологии послойного синтеза объектов, которые широко применяются в различных прикладных сферах, от производства до медицины. Аддитивные технологии позволяют изготавливать сложные объекты с внутренними полостями, которые трудно, либо невозможно изготовить традиционными методами микрофабрикации. Подобные технологии могут быть полезны для изготовления сложных структур спинового льда. Существуют различные методы печати, но процесс создания объекта одинаковый: создание цифровой 3D-модели образца, подготовка принтера к печати, загрузка материала, печать и постобработка. Для изготовления основания для структур спинового льда хорошо подходят аддитивные методики проекционной микростереолитографии и двухфотонной фотополимеризации, благодаря высокому разрешению печати.

2.3.1 Проекционная микростереолитография – P μ SL (Projection Microstereolithography)

Проекционная микростереолитография (P μ SL), технология 3D-печати на основе цифровой обработки света, позволяет создавать 3D-объекты со сложной геометрией с высоким разрешением при помощи зонной ультрафиолетовой проекции, которая запускает локальную фотополимеризацию, приводящая к затвердеванию полимеризованного объёма [9]. В качестве материала используется фоторезист - материал, изменяющий свои свойства под воздействием светового излучения. Преимущества технологии P μ SL заключаются в высокой точности печати (до 2 мкм) и области печати в несколько см².

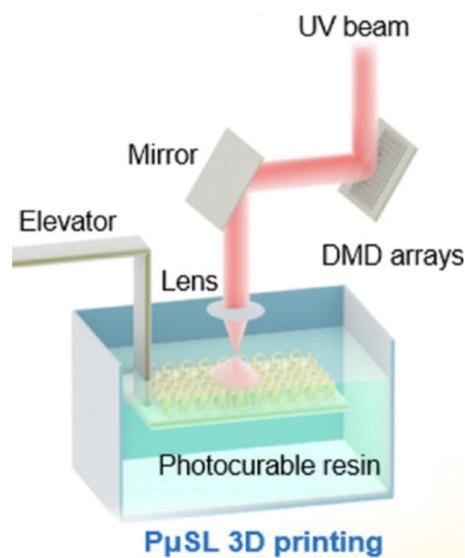


Рис. 3. Схема из [9] работы P μ SL принтера.

2.3.2 Двухфотонная полимеризация (2PP)

Двухфотонная полимеризация (2PP) позволяет изготавливать трехмерные микроструктуры с разрешением до 100 нм [10]. Для этого перетяжка фемтосекундного лазерного излучения перемещается в объеме фоторезиста по заданной траектории, локально модифицируя засвеченное вещество. Специальное фоточувствительное вещество – фоторезист, который поглощает инфракрасное излучение лишь в области лазерной перетяжки, в результате чего засвеченный материал становится нерастворимым. Перемещая перетяжку в фоторезисте в трех измерениях, можно создавать трехмерные структуры произвольной формы. В отличие от однофотонного поглощения (Рис. 4а), происходящего равномерно вдоль оптической оси, вероятность двухфотонного поглощения (Рис. 4б) максимальна в области перетяжки (фокусировки) лазерного излучения и квадратично убывает при удалении от нее.

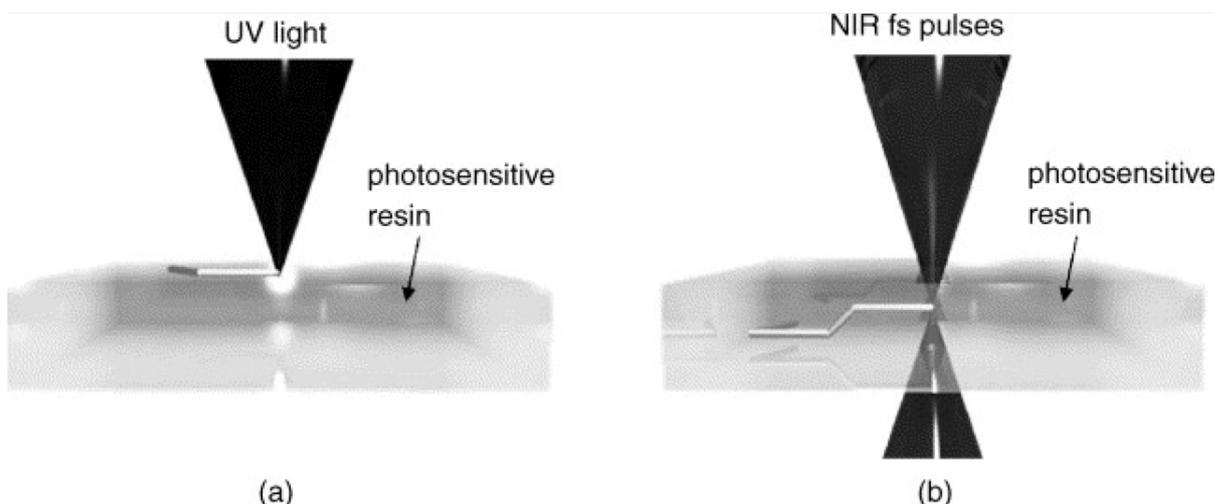


Рис. 4. Схема из [10] работы 2PP принтера. (а) Однофотонная полимеризация. (б) Двухфотонная полимеризация.

Технология 2PP часто используется для создания микрофлюидных устройств. В последнее время актуальны исследования по использованию 2PP в медицинских целях [11]. Однако из-за своего высокого разрешения (менее 100 нм) 2PP имеет очень длительное время изготовления (более нескольких часов). Кроме того, 2PP по-прежнему ограничивается использованием фоточувствительных полимеров из промышленности микроэлектроники, которые, как правило, демонстрируют низкую биосовместимость [12]. Однако в настоящее время разрабатываются новые и улучшенные коммерческие фоточувствительные био-чернила, совместимые с 2PP, чтобы восполнить этот технологический пробел [13]. На данном этапе выбрана 2PP для возможности тонкой отработки элементов структуры спинового льда, так как она обладает более высоким разрешением, а площадь печати на этом этапе не так важна. Для печати более протяженных структур потребуется применение P μ SL.

3 Подготовка к эксперименту

Основу эксперимента составляет 3D-печать микроструктуры спинового льда. На эту микроструктуру, играющую роль основания, будет напыляться ферромагнитный материал. Для реализации спинового льда на таком масштабе нужно подобрать материал, который будет обеспечивать фрустрацию в системе. Необходимыми условиями являются однодоменность отдельных ячеек (в данном случае, ферромагнитных полосок) с магнитным моментом и возможность этих ячеек влиять на направление магнитного момента соседних ячеек, распространяя «волну» перемагничивания ячеек. Расположение ячеек для проверки наличия фрустрации имеет сеточную структуру (см. Рис. 5). Цветом обозначены ячейки (полоски). Стрелками обозначены направления магнитных моментов отдельных ячеек. Желтыми пятнами обозначены искусственные магнитные монополи [6]. В дальнейшем планируется 3D структура (см. Рис. 2), которую можно создать только при помощи аддитивных технологий в виду ее сложной геометрии.

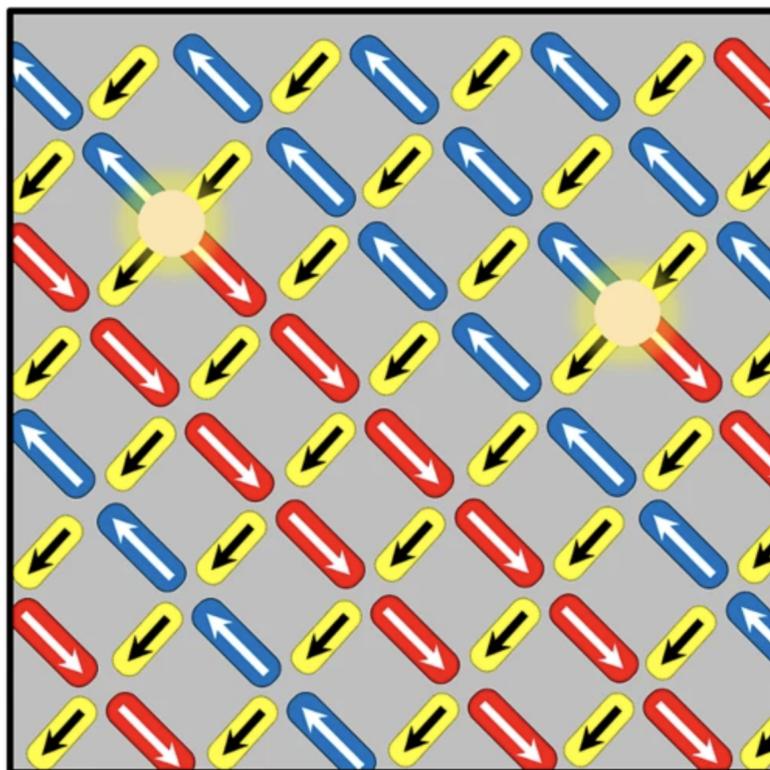


Рис. 5. Из [6]. Плоская структура искусственного спинового льда.

3.1 Выбор материала для изготовления (пермаллоя и полимера). Критерий однодоменности

В данном эксперименте образцы ячеек спинового льда имеют форму полосок. Одним из обязательных условий создания спинового льда является обеспечение однодоменности полосок в элементарной ячейке структуры [14]. Домен – область с однородной намагниченностью. Объект называется однодоменным, если во всем его объеме магнитные моменты частиц параллельны, а однодоменность при этом сохраняется при любом направлении внешнего магнитного поля. Однодоменность зависит от многих факторов, в том числе от размеров и геометрии образца. Для каждого материала существует критерий однодоменности r – характерный размер частицы, меньше которого она существует только в однодоменном состоянии [15]. Значения r для частиц из разных материалов заключены в пределах 0,01 – 10 мкм и зависят, в частности, от величин константы магнитной анизотропии и обратно пропорциональны намагниченности насыщения материала [16]. Подобрав определенное соотношение сторон, можно добиться однодоменной структуры, даже если некоторые из пространственных параметров объекта превосходят критерий r для этого материала. Соотношение m длины A к ширине B : $m = A/B > 20$ обеспечивает однодоменность [1]. Исходя из этого соотношения и разрешения при печати (1-2 мкм), минимальная ширина полоски от 1-2 мкм, а длина, соответственно от 20 мкм. Учитывая эти параметры, в качестве напыляемого материала был выбран пермаллой $Ni_{80}Fe_{20}$ благодаря своим магнито-мягким свойствам и необходимым размером однодоменных областей.

Магнитный момент ориентируется, в отсутствие внешнего магнитного поля, по оси легкого намагничивания, при этом, количество осей легкого намагничивания зависит от вида кристаллической решетки, внутренних напряжений, формы и т.д. Поэтому, в общем случае, магнитный момент образца параллелен оси легкого намагничивания, которая может быть направлена в

произвольном направлении (таких осей может быть несколько). В эксперименте, при отработке режимов напыления, было проведено осаждение материала на полимерную структуру с поверхностью 50 мкм x 150 мкм, изготовленную из того же полимера, что и будущая основа под спиновый лед (см. Рис.6).

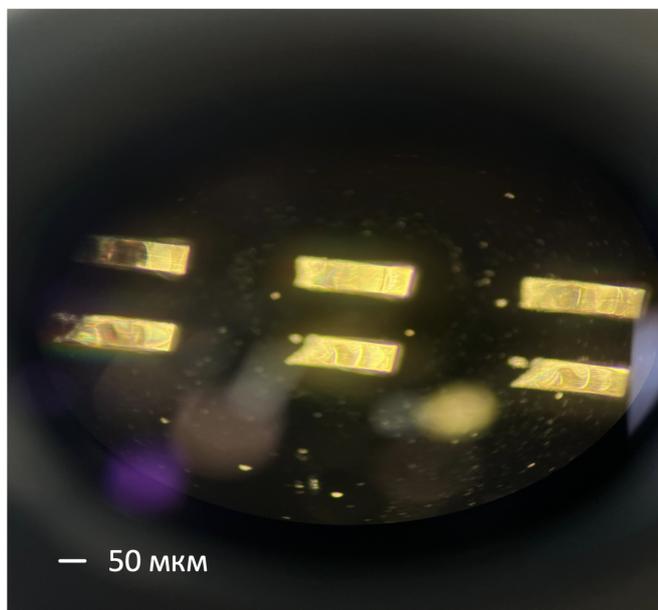


Рис. 6. Тестовая полимерная структура для отработки режимов термического напыления.

Для проверки работы соотношения 20:1 для выполнения условия однодоменности были выбраны полосы различного масштаба: с шириной от 3 до 6 мкм и длиной от 60 до 100 мкм, при этом, толщина напыляемого материала $h = 30$ нм. Для того, чтобы образец удовлетворял условию применимости модели Изинга, магнитный момент должен быть направлен строго вдоль плоскости XY. Подбранная толщина h должна обеспечить направление вектора общей намагниченности (магнитного момента единицы объема) ячейки в плоскости XY.

3.2 Влияние соседних магнитных моментов друг на друга для переключения

Вторым упомянутым условием для создания спинового льда является способность магнитных моментов полосок перемагничивать соседние полоски. Взаимодействие двух соседних ферромагнетиков объясняется магнитным диполь-дипольным взаимодействием, где величина взаимодействия обратна пропорциональна расстоянию от источника в третьей степени [17]. При воздействии магнитного поля на ферромагнетик важна комбинация таких факторов как намагниченность M и размер объекта, его константа анизотропии и расстояние от источника поля r и величина поля H , которое действует на объект. Более того, для перемагничивания доменов материал должен обладать высокой магнитной восприимчивостью, которая зависит от температуры [16]. Достижение ферро- или ферримагнитного состояния требует значение магнитной восприимчивости много больше единицы. Помимо этого, у материала должна быть большая намагниченность насыщения и маленькая коэрцитивная сила, чтобы один ферромагнетик был способен перемагнитить соседний [17]. Благодаря тому, что пермаллой $Ni_{80}Fe_{20}$ - магнито-мягкий материал с достаточной намагниченностью насыщения $M_s = 830 * 10^3$ А/м и низкой коэрцитивной, силой это должно обеспечить переключение доменов.

3.3 Реализация однодоменных полосок

После определения выбора пермаллоя $Ni_{80}Fe_{20}$ в качестве материала для изготовления спинового льда требуется определиться с геометрическим устройством образца. Основная идея основана на подходе из работы [6], в которой материал осаждается на периодическую полимерную микроструктуру вида как на Рис. 2. Осажденный сверху материал приобретает те же геометрические параметры, что и поверхность, на которую он осаждается. В данном случае, такая геометрия обеспечивает однодоменность. Учитывая материал

печати (фотополимер) и разрешение была выбрана технология 2PP. В будущем, чтобы делать более протяженные структуры, будет сделан уклон в сторону PμSL.

3.4 3D-модели экспериментальных образцов

Перед тем, как изготавливать основную структуру для искусственного спинового льда, необходимо экспериментально проверить, удовлетворяет ли пермаллой требованиям однодоменности и влияния на соседние домены, а также при каких размерах будет проявляться однодоменность. Для этого при помощи программы Autodesk Fusion были созданы 3D-модели образцов для проверки однодоменности при соотношении сторон на поверхности 1:20 (Рис.7).

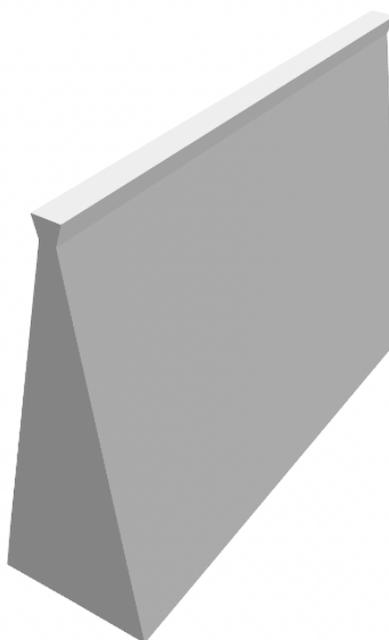


Рис. 7. 3D-модель образца для проверки критерия однодоменности.

При термическом напылении, область, на которую осядет материал значительно превышает размеры структуры, поэтому изготовить отчетливые “полоски” проблематично. Для решения этой проблемы необходимые “полоски” располагаются на возвышении высотой 60 мкм от основания. При такой геометрии, материал, осаждающийся сверху, перпендикулярно к поверхности, частично осядет на полоске, а оставшаяся часть на основание. При этом, непосредственно перед самой “полоской”, основание сужается, а затем расширяется, что предотвращает формирование непрерывной пленки из осажденного материала за счет эффекта «тени» при напылении.

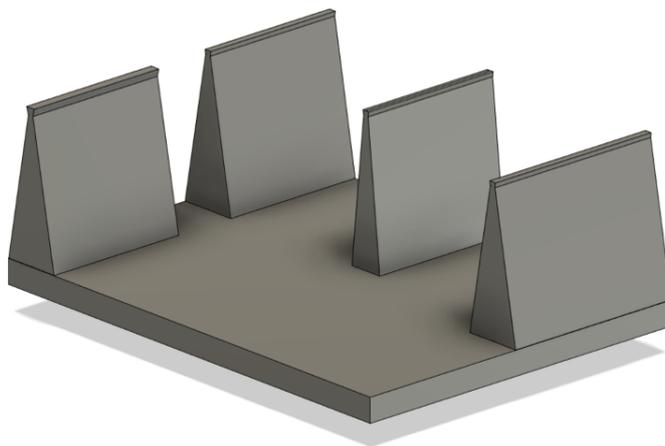


Рис. 8. 3D-модель структуры образцов перед печатью.

4 Изготовление экспериментальных образцов

При помощи технологии двухфотонной литографии (2PP) [18] была напечатана структура (Рис. 9, 10) с разными параметрами длины и ширины поверхности (ширина от 3 до 6 мкм, длина от 60 до 100 мкм). Длительность печати зависит от геометрии и размеров образцов. Цикл работы от загрузки модели до постобработки может длиться от нескольких часов до суток.

4.1 Описание процесса печати

Перый шаг - построение исходной 3D-модели изготавливаемой микроструктуры в системе координат XYZ. Далее следует изготовление калибровочного образца при заданных оптических параметрах процесса двухфотонной литографии с последующим определением средних значений размеров полуосей сформированных в образце эллипсоидных вокселе. С учетом измеренных размеров вокселя (минимального поляризуемого объема фоторезиста) определяют координаты центров граничных вокселей, каждый из которых касается исходной поверхности модели хотя бы в одной точке и находится внутри области, ограниченной поверхностью. После чего построенную модель корректируют посредством формирования поверхности, задающаяся координатами центров граничных вокселей. Скорректированную модель разбивают на слои, расположенные параллельно плоскости XY, с шагом, сопоставимый с размером вокселя вдоль оси. В каждом слое формируют траектории движения лазерного луча таким образом, что они не пересекают поверхность скорректированной модели. Экспонирование лазерным излучением осуществляют согласно заданным траекториям движения лазерного луча и оптическим параметрам процесса экспонирования двухфотонной литографии.

В качестве оптических параметров задают поляризацию и мощность лазерного излучения, скорость движения фокусной перетяжки лазерного излучения, тип объектива.

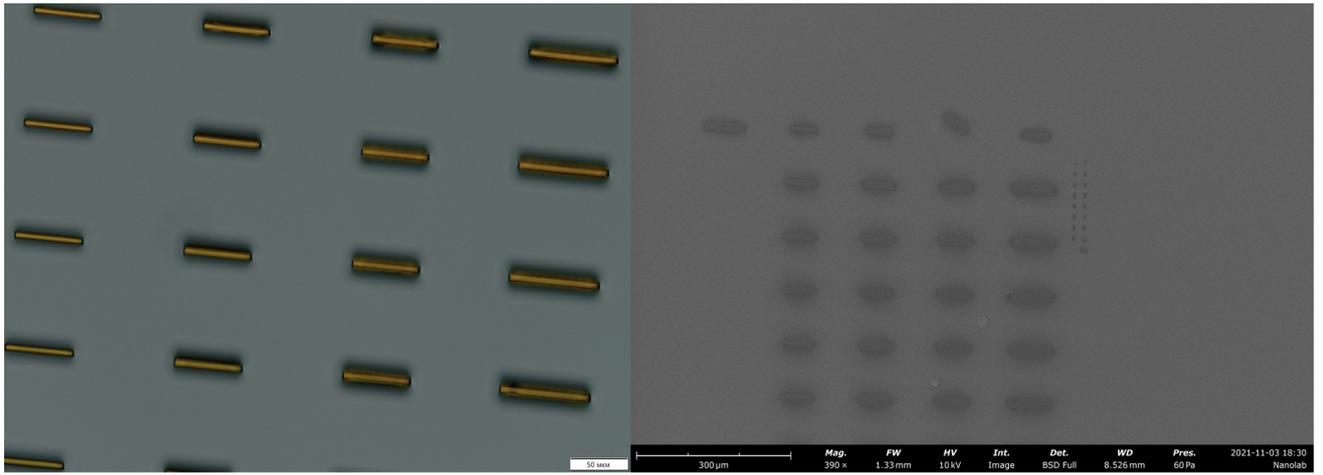


Рис. 9. Снимки напечатанной структуры образцов, сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа (англ. SEM - Scanning electron microscope).

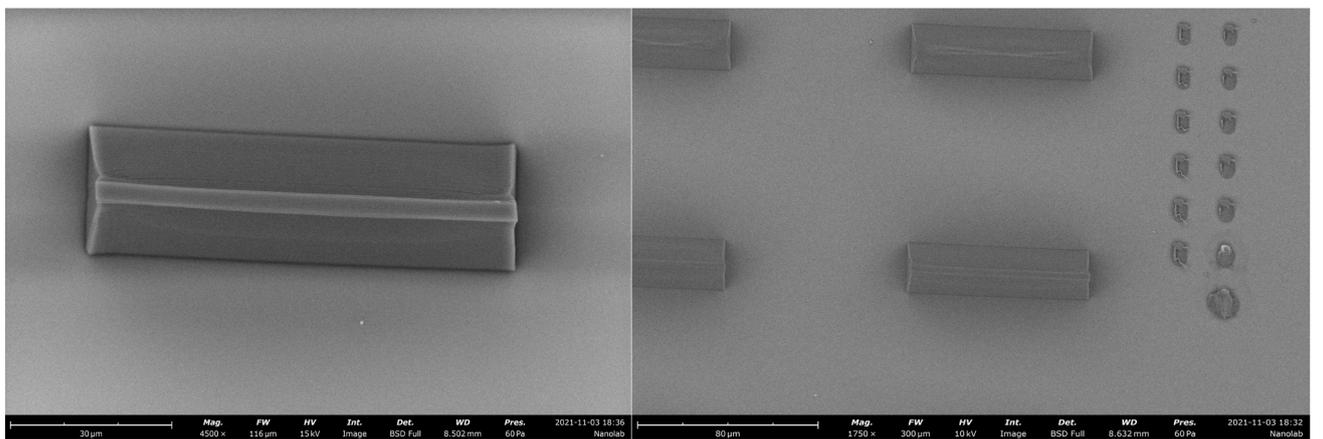


Рис. 10. Снимки напечатанной структуры образцов, сделанные с помощью SEM.

4.2 Методика экспериментов



Рис. 11. Описание цикла работы для проверки однодоменности образцов

Эксперимент начинается с подбора параметров поверхности, на которую будет термически напыляться материал, создается соответствующая 3D-модель и печатается с помощью 2PP. Используемый для напыления материал, измельчается в мелкую стружку. После измельчения проводится измерение химического состава полученной стружки на наличие примесей при помощи рентгено-структурного микроанализа (РСМА). Для верификации анализа использовался метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Далее происходит термическое напыление материала на подложку до тех пор, пока не будет отработан режим напыления, который должен выполнять следующие условия: соотношение Ni к Fe после напыления должно сохраняться и равняться 80:20, должны отсутствовать примеси и толщина пленки должна быть около 30-50 нм. Вторичная ионная масс-спектрометрия заключается в анализе данных вторичных ионов с помощью масс-спектрометра. Эмиссия вторичных ионов твердой поверхностью при ионной бомбардировке дает

информацию об элементарном, изотопном и молекулярном составе верхних атомных слоев поверхности образца [19].

4.3 Термическое осаждение

Для нанесения материала на полимер используется технология термического напыления, выбор методики формирования тонкой пленки влияет на конечную доменную структуру. Термическое осаждение — широко распространённый метод вакуумного напыления. Исходный материал испаряется в вакууме. Вакуум позволяет частицам пара конденсироваться непосредственно на напыляемом изделии (подложке). Термическое напыление использует два физических процесса: испарение нагретого исходного материала и конденсацию его на подложке. Система термического напыления включает в себя вакуумную камеру, в которой поддерживается высокий вакуум, подложку и источник тепла, передаваемого испаряемому материалу [20]. Дополнительное осаждение полимера и металла должно увеличить механические напряжения внутри пермаллоя и увеличить критерий однодоменности [1].

Для тестирования были проведены пробные эксперименты с напылением имеющегося материала на кремниевую подложку.

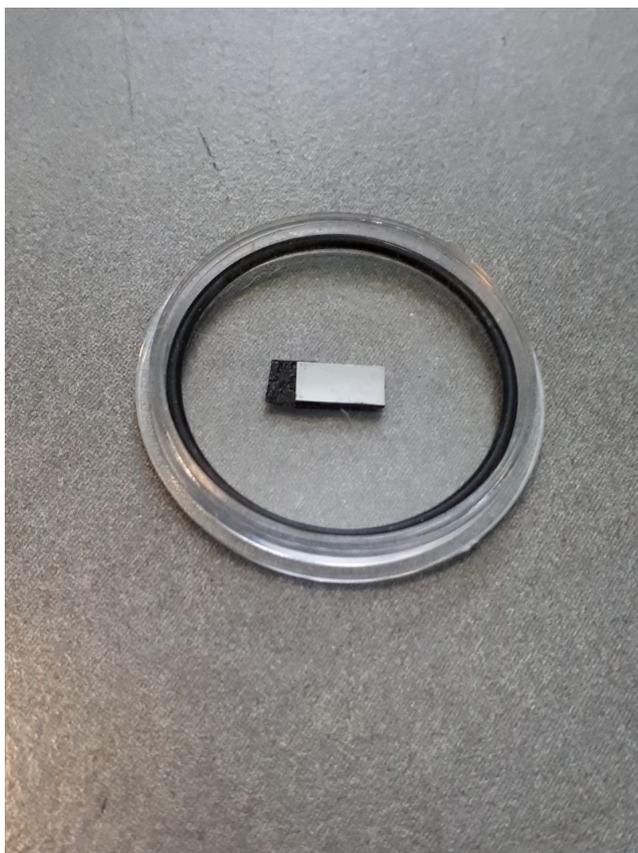


Рис. 12. Результат пробного термического напыления $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ на кремниевую подложку размером 3×6 мм.

Цель пробного эксперимента - проверить качество напыления (химический состав напыленного материала, процентное соотношение никеля к железу, толщину напыленного слоя). После отработки режимов происходит напыление на полимерную структуру.

4.4 Анализ химического состава

После напыления происходит анализ химического состава вещества. В процессе получения желаемого результата напыления были проведены измерения химического состава вещества при помощи РЭМ (РСМА) и измерение при помощи ВИМС для верификации полученных результатов. На рисунке приведен один из результатов анализа химического состава.

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. Weight Conc.
8	O	Oxygen	9.521	2.900		
11	Na	Sodium	4.796	2.100		
26	Fe	Iron	13.544	14.400		
27	Co	Cobalt	0.000	0.000		
28	Ni	Nickel	72.139	80.600		

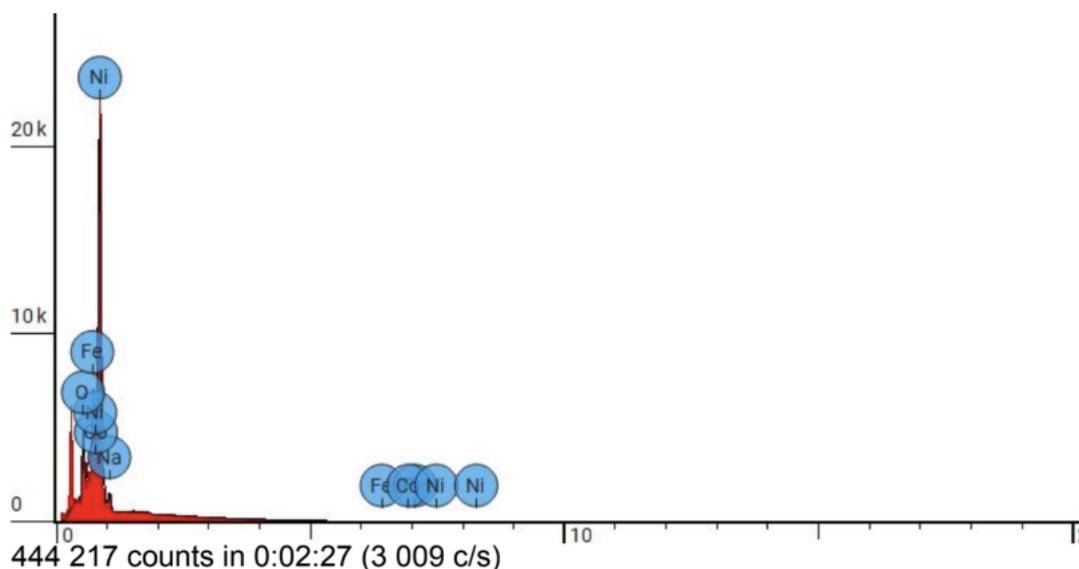


Рис. 13. Результаты химического анализа напыленного материала при помощи РСМА.

Наличие “примесей” в измерении обуславливается принципом работы сканирующей электронной микроскопии. Толщина образцов для измерения сильно тоньше проникающей способности прибора, в связи с чем происходит анализ элементов под образцом, например скотч, на который приклеены образцы. После отработки режимов производится итоговое напыление на полимерную структуру. На рис.13 изображен результат напыления пермаллоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ на полимерную структуру [18], напечатанную на стеклянной подложке при помощи 2PP.

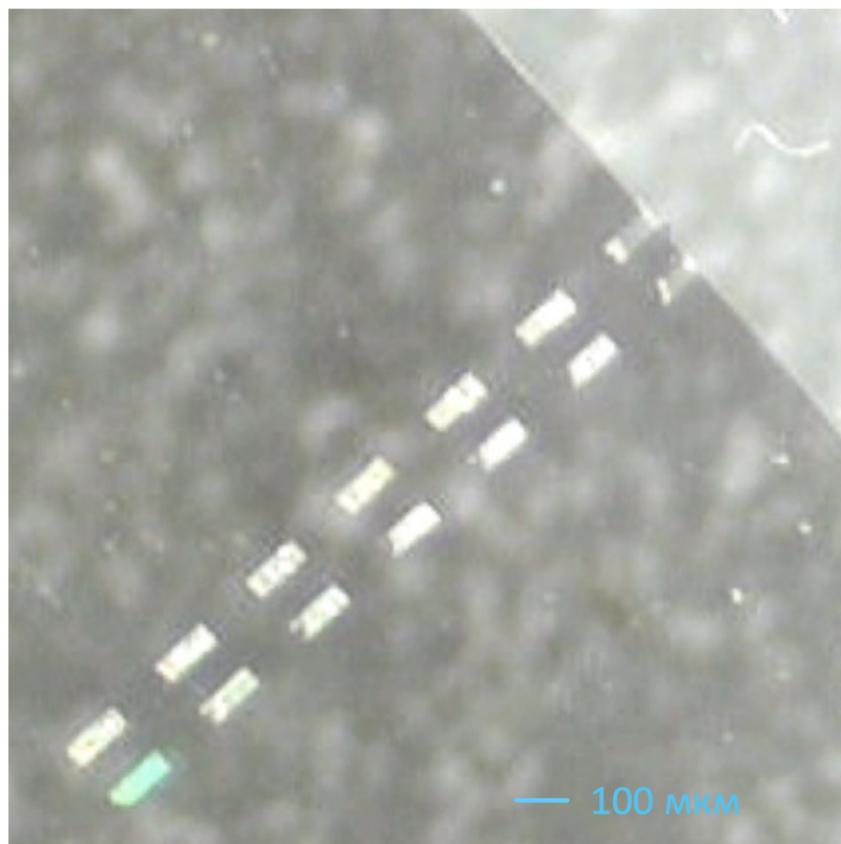


Рис. 14. Пробное термическое напыление $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ на полимерную структуру. Материал осажден как на полимерную структуру, так и на саму подложку. В результате получены обособленные полосы из пермаллоя, осажденные на поверхности полимера.

4.5 Керр-микроскоп-магнитометр

Последним шагом является изучение доменной структуры полученной пермаллоевой пленки на полимерной структуре. Измерения доменной структуры проводились при помощи микроскопа Керра. Образец с намагниченностью в плоскости освещается светом, поляризованным параллельно плоскости падения. Вектор электрического поля E падающего света вместе с вектором намагниченности m генерирует движение электронов согласно правилу Лоренца (правой руки). Если результирующая скорость Лоренца V_L проецируется на плоскость, перпендикулярную направлению распространения отраженного света, получается магнитооптическая амплитуда K [21].

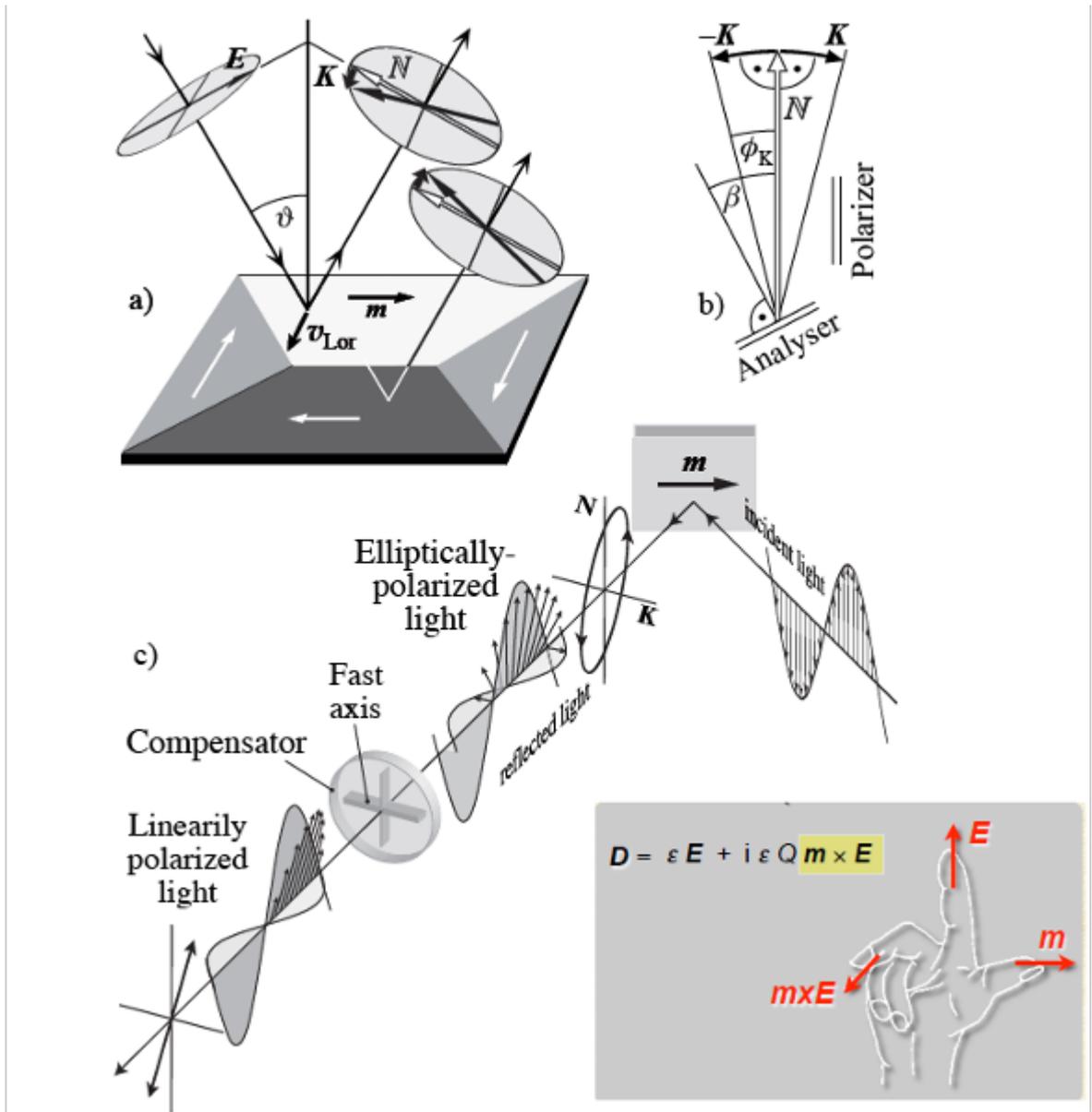


Рис. 15. Принцип работы эффекта Керра из [21].

Интерференция нормально отраженного компонента N и магнитооптическая амплитуда K приводит к зависящему от намагниченности вращения света на небольшой угол Φ_K , что при использовании анализатора приводят к контрасту области (b). Анализатор на самом деле должен быть установлен под углом $> \Phi_K$, чтобы улучшить видимость области. Действие компенсатора показано на картинке (c). Он преобразует эллиптический свет в линейную волну, сдвигая две составляющие ортогональные компоненты волны. Эффект Керра - это поверхностный магнитооптический эффект, поэтому в результате измерений на Керровском микроскопе, мы получаем доменную

структуру на поверхности нашего образца, либо всего образца, если он достаточно тонкий.

4.6 Полученная доменная структура

Ширина тестовой платформы составила 50 микрон, ширина доменов 1-2 микрона, а длина 35-40 мкм, поэтому при печати более узких и коротких платформ, возможно, получится сделать монодоменные полосы.

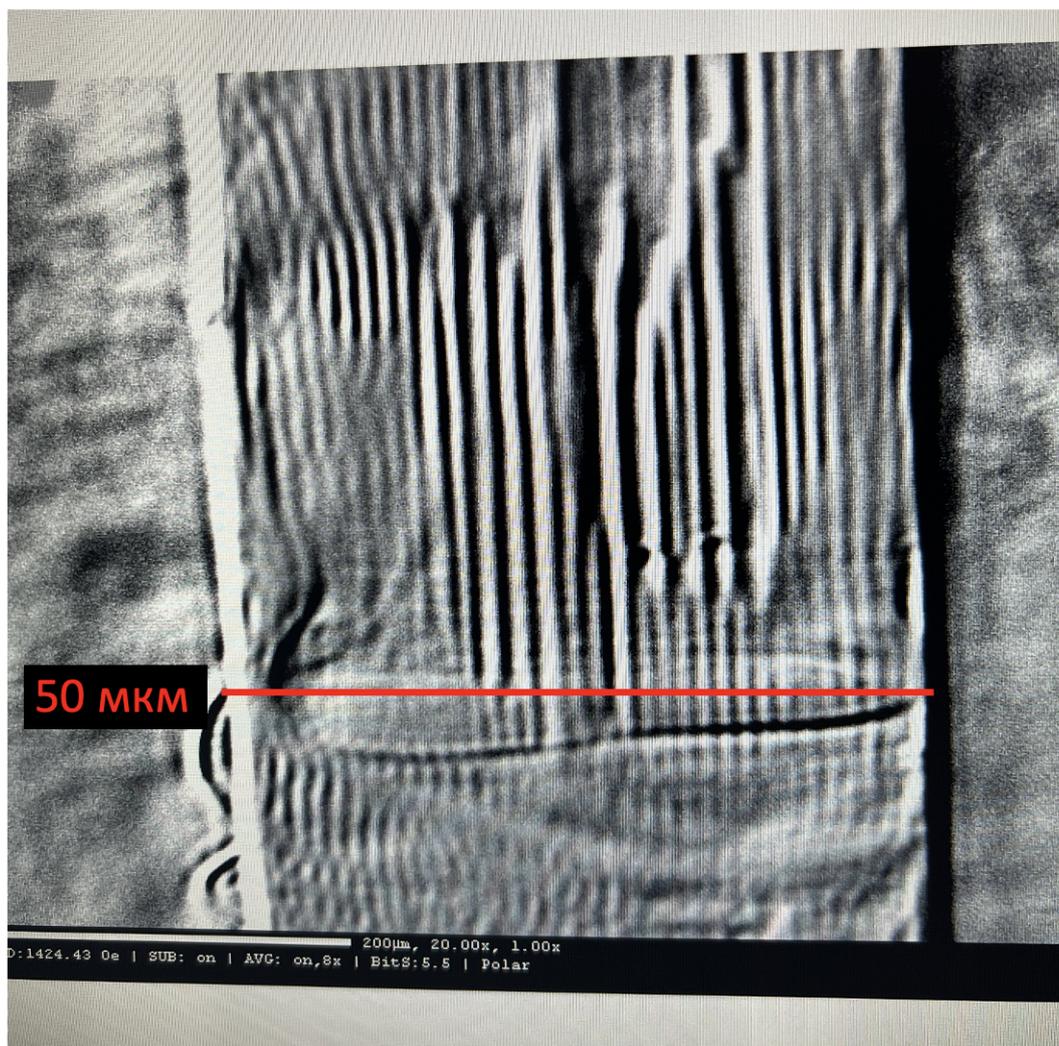


Рис. 16. Фото доменной структуры напыленного материала, полученное с помощью керровского микроскопа.

Таким образом, были отработаны режимы печати полимерных структур и термического осаждения пермаллоя на эти структуры. Исходя из данных

полученной доменной структуры, было экспериментально проверено, что соотношение параметров длины и ширины примерно 20:1 обеспечивает однодоменность полученного материала. Толщина напыления много меньше длины или ширины (в 100 раз). Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при изготовлении структуры спинового льда для проверки возможности эмулирования нейронных сетей Хопфилда.

5 Результаты измерений и выводы

Предложены параметры конструкции спинового льда, пригодные для экспериментального изготовления методами аддитивных технологий. В результате проделанной работы был отобран и найден соответствующий материал для проведения измерения ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$). Материал был измельчен с привлечением дружественной лаборатории из института физических проблем им. П.Л. Капицы. Для проверки однодоменности материала были созданы цифровые 3D-модели 25 платформ, которые в последствии напечатаны при помощи двухфотонной литографии и использованы для термического напыления. Параметры платформ выбраны таким образом, чтобы проверить наличие однодоменности при соотношении сторон 1:20, ширина варьировалась от 3 до 6 мкм, а длина от 60 до 100 мкм. Были проведены 3 термических напыления пермаллоя для отработки процесса и проверки качества напыления. После каждого напыления химический состав определялся при помощи РСМА, что подтверждало наличие Ni и Fe в соотношении 80:20, для более детального анализа на наличие примесей применялся ВИМС. Отдельно напечатана серия из полимерной структуры из того же фотополимера для пробного термического напыления и изучения доменной структуры пермаллоя. Картина доменной структуры $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, полученная при помощи керровского микроскопа, подтвердила наличие однодоменности при соотношении сторон 1:20 у выбранного материала. Из этого следует, что при напылении на более тонкие структуры с шириной 1-2 мкм можно реализовать однодоменные полоски из пермаллоя. Для дальнейшего использования полученных результатов требуется проверка наличия фрустрации в системе из однодоменных полосок. Это позволит реализовать систему искусственного спинового льда и проверить на ней возмужность эмуляции нейронных сетей Хопфилда для аналогового решения задач оптимизации и распознавания.

6 Список литературы

1. Chung T.Y., Hsu S.Y. Magnetization reversal in single domain Permalloy wires probed by magnetotransport // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103, № 7. P. 17–20.
2. Castelnovo C., Moessner R., Sondhi S.L. Magnetic monopoles in spin ice // Nature. 2008. Vol. 451, № 7174. P. 42–45.
3. Pearce M.J. et al. Magnetic monopole density and antiferromagnetic domain control in spin-ice iridates // Nat. Commun. Springer US, 2022. Vol. 13, № 1. P. 4–10.
4. Schiffer P., Nisoli C. Artificial spin ice: Paths forward // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics Inc., 2021. Vol. 118, № 11.
5. Schiffer P., Nisoli C. Artificial spin ice: Paths forward // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics, 2021. Vol. 118, № 11. P. 110501.
6. May A. et al. Magnetic charge propagation upon a 3D artificial spin-ice // Nat. Commun. 2021 121. Nature Publishing Group, 2021. Vol. 12, № 1. P. 1–10.
7. Saccone M. et al. Direct observation of a dynamical glass transition in a nanomagnetic artificial Hopfield network // Nat. Phys. 2022. P. 1–22.
8. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные Нейронные Сети И Их Приложения. 2018. P. 121.
9. Wang Y. et al. Three-dimensional stretchable microelectronics by projection microstereolithography (PSL) // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2021. Vol. 13, № 7. P. 8901–8908.

10. Wu S., Serbin J., Gu M. Two-photon polymerisation for three-dimensional micro-fabrication // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2006. Vol. 181, № 1. P. 1–11.
11. Lee K.S. et al. Advances in 3D nano/microfabrication using two-photon initiated polymerization // *Prog. Polym. Sci.* 2008. Vol. 33, № 6. P. 631–681.
12. Nguyen A.K., Narayan R.J. Two-photon polymerization for biological applications // *Mater. Today. Elsevier Ltd.*, 2017. Vol. 20, № 6. P. 314–322.
13. Dobos A. et al. Thiol–Gelatin–Norbornene Bioink for Laser-Based High-Definition Bioprinting // *Adv. Healthc. Mater.* 2020. Vol. 9, № 15. P. 1–9.
14. May A. et al. Realisation of a frustrated 3D magnetic nanowire lattice // *Commun. Phys. Springer US*, 2019. Vol. 2, № 1. P. 1–9.
15. Sokolov I.E. et al. Production of single-domain powders of europium iron garnet using supercritical fluid technology // *J. Magn. Magn. Mater.* 2022. Vol. 555.
16. Zhao Z.Y. et al. Magnetic phase transitions and magnetoelectric coupling of GdFeO 3 single crystals probed by low-temperature heat transport // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 2011. Vol. 83, № 1. P. 1–8.
17. Gonçalves R.S. et al. Naked-eye visualization of geometric frustration effects in macroscopic spin ices // *J. Magn. Magn. Mater. Elsevier B.V.*, 2020. Vol. 502, № December 2019. P. 166471.
18. Sharipova M.I. et al. Effect of pyrolysis on microstructures made of various photoresists by two-photon polymerization: comparative study // *Opt. Mater. Express.* 2021. Vol. 11, № 2. P. 371.
19. Liu B. et al. In situ chemical probing of the electrode-electrolyte interface by ToF-SIMS // *Lab Chip.* 2014. Vol. 14, № 5. P. 855–859.

20. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices: Third Edition // Physics of Semiconductor Devices: Third Edition. 2006. 1–815 p.
21. Schäfer R. Investigation of Domains and Dynamics of Domain Walls by the Magneto-optical Kerr-effect // Handb. Magn. Adv. Magn. Mater. 2007.