

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«Получение кривой намагничивания и петли гистерезиса пленок
ферритов-гранатов с помощью анализа доменной структуры при
перемагничивании»**

**Выполнил студент
419 группы
Гусейнов Мехрадж Вугар Оглы**

**Научный руководитель:
К.ф.-м.н., с.н.с. Шапаева Т.Б.**

**Допущен к защите
Зав. Кафедрой магнетизма
Проф. Перов Н.С.**

МОСКВА 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Физический практикум	5
1.1 Роль физического практикума при подготовке технических специалистов в высшей школе	5
1.2 Спецпрактикум кафедры магнетизма	7
Глава 2. Материалы и методы	9
2.1 Магнитооптические свойства пленок ферритов-гранатов	9
2.2 Наблюдение доменной структуры пленки феррита-граната с помощью магнитооптического эффекта Фарадея	11
2.3 Экспериментальная установка	13
Глава 3. Основная часть	15
3.1 Работа над контрастом фотографий доменной структуры	15
3.2 Использование программы для расчета относительной разности площадей доменов с противоположным направлением намагниченности	19
3.3 Разность относительных площадей доменов с противоположной намагниченностью для разных участков одного образца	22
3.4 Зависимость ширины домена и периода доменной структуры от внешнего магнитного поля	26
3.5 Выбор образца	31
3.6 Сравнение с кривой, полученной на вибрационном магнитометре	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
ВЫВОДЫ	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	45

ВВЕДЕНИЕ

Многие законы физики были получены на основе анализа результатов наблюдений. Изучая различные физические процессы, можно выявить закономерности их протекания и сделать выводы о природе тех или иных физических явлений. Очевидно, что наглядные демонстрации, проведение практических работ и анализ полученных данных, позволяет учащимся лучше понять суть изучаемого явления.

В настоящее время во многих школах и вузах выполнение лабораторных работ и проведение практических занятий или полностью отсутствует в учебном плане или заменено виртуальными задачами, при выполнении которых студенту отводится роль зрителя, а не участника эксперимента. В таких условиях трудно подготовить высококвалифицированных технических специалистов, в которых так нуждается современная отечественная наука и производство.

Известно, что в последние годы развитие технологий происходит на стыке нескольких направлений. Так, например, в основе разработки компьютеров нового поколения лежат, в частности, достижения в области синтеза и производства новых материалов, развитие методов исследования свойств этих материалов. Также немаловажным является удобство в использовании нового оборудования, его воздействие на здоровье пользователя и конкурентоспособность на рынке аналогичных устройств. Т.е. в работе над созданием нового оборудования совместно с химиками и физиками активно работают дизайнеры, медики и экономисты.

Именно поэтому представляется актуальным создание таких задач физического практикума, в которых, с одной стороны, для объяснения изучаемых явлений были бы использованы законы разных разделов физики, а с другой, полученные результаты были бы наглядны и достаточно просты в интерпретации. Кроме того, немаловажным является доступность и удобство в эксплуатации и в обслуживании используемого оборудования.

В настоящей работе представлено описание новой задачи спецпрактикума кафедры магнетизма физического факультета МГУ, в которой измерение кривой намагничивания и петли гистерезиса проводится с помощью анализа изображений доменной структуры при перемагничивании. Эти изображения получают с помощью микроскопа и камеры для микросъемки, используя магнитооптический эффект Фарадея, и анализируют с помощью специальной программы.

Глава 1. Физический практикум

1.1 Роль физического практикума при подготовке технических специалистов в высшей школе

Физический практикум является важным звеном в системе школьной и вузовской подготовки будущих ученых и технических специалистов. Практические занятия играют важную роль в процессе изучения студентами основных физических законов, прививают навыки постановки и проведения физического эксперимента, знакомят с методами обработки результатов измерений, их систематизации и представлением полученных данных в виде графиков и таблиц.

В настоящее время, к сожалению, в школах и некоторых ВУЗах России многие эксперименты не могут быть проведены в силу целого ряда причин, например, из-за дороговизны оборудования или большого размера установок. В подобных случаях практикум, как правило, представляет собой в основном компьютерное моделирование физических законов, имитирующее поведение реальной системы. В этом случае результат будет получен, независимо от навыков студента, и учащийся не сможет в полной мере осознать, как этот результат был получен, и почему он именно такой. То есть практических навыков исследования студент не приобретет, и основная задача практикума – помощь в освоении нового материала, решена не будет. В идеальной ситуации учащиеся должны самостоятельно подготовить установку к проведению эксперимента и настроить ее, чтобы получить результаты, подтверждаемые теорией. В случае отсутствия такой практической деятельности у учащихся может пропасть интерес к углубленному изучению физики.

Для современных студентов осмысление сложных абстрактных понятий нередко затруднительно без наблюдения реальных физических явлений. Учащийся не видит связи между тем, что написано в книге или излагается на лекциях, и тем, что окружает его в реальном мире. Вот здесь роль

демонстраций и выполнения задач физического практикума трудно переоценить.

Преимущества физического эксперимента в форме выполнения задачи практикума, в высокой степени участия и самостоятельности студента при проведении эксперимента и обработке полученных результатов, а также в выработке умений и навыков работы с физическими приборами, возможности выполнения задачи в темпе и по плану, который определяется самим учащимся.

Одним из важных преимуществ выполнения задач практикума является то, что они могут быть различны по уровню сложности и характеру экспериментов. Задачи практикума могут быть неравноценны по необходимому для их выполнения времени и различны по уровню сложности: для выполнения некоторых хватает 1 часа, а другие требуют 3 часа. Поэтому в описании одних задач материал будет разобран подробно, а в описании других, в силу их простоты, можно позволить студенту самому изучить и понять суть эксперимента, предоставив в помощь только краткие указания. Второе немаловажное преимущество практикума состоит в том, что учащемуся не приходится подстраиваться под скорость восприятия материала другими студентами, он может полностью разобраться в задаче самостоятельно и выполнить эксперимент корректно.

На физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова на выполнение задач общего физического практикума выделено 12 занятий две пары, что вполне оправдано. Но, к сожалению, практикум не охватывает все разделы курсов, из-за того, что некоторые явления трудно воспроизвести и изучить в условиях небольшой лаборатории. Поэтому есть потребность в создании задач практикума, не требующих использования крупногабаритного и дорогостоящего оборудования. Кроме того, если установка сложная, бывает трудно починить ее в случае появления неполадок. Выход из строя установки физического практикума в семестре приводит к тому, что студентам

приходится выполнять смежную задачу или просто пропускать занятие практикума.

1.2 Спецпрактикум кафедры магнетизма

На кафедре магнетизма физического факультета МГУ практически с момента ее образования в 1931 году работает спецпрактикум, с описанием его задач можно ознакомиться на сайте: <http://magn.phys.msu.ru/Rus/prac.html>. Многие задачи практикума сводятся к нахождению кривой намагничивания.

Для получения этой кривой могут быть использованы разные магнитометры: астатический, вибрационный, индукционный и квантовый. В основе астатического магнитометра лежит измерение механических моментов, действующих на чувствительный элемент прибора в измеряемом поле. Индукционный магнитометр основан на явлении электромагнитной индукции, то есть возникновении ЭДС в измерительной катушке при изменении проходящего сквозь ее контур магнитного потока. Работа квантового магнитометра основана на измерении частоты свободной прецессии магнитных моментов электронов и ядер во внешнем магнитном поле и других квантовых эффектах.

Эти методы хорошо известны и используются повсеместно. Можно также получить кривую намагничивания, используя магнитооптические эффекты.

[1] Один из таких методов основан на анализе изображения доменной структуры, полученного с помощью эффекта Фарадея. Этот метод можно использовать только для прозрачных ферромагнитных материалов, обладающих большим удельным фарадеевским вращением.

Цель настоящей работы – создание новой задачи для спецпрактикума кафедры магнетизма, посвященной получению кривой намагничивания и петли гистерезиса по анализу изображений доменной структуры пленок ферритов-гранатов и сравнение этих результатов с данными, полученными после измерений на вибрационном магнитометре.

Суть анализа доменной структуры заключается, во-первых, в определении отношения площадей доменов с противоположной намагниченностью к площади всей фотографии в зависимости от внешнего магнитного поля и, во-вторых, в измерении периода доменной структуры и ширины доменов выбранной намагниченности в зависимости от внешнего магнитного поля. Используя эти подходы, можно получить кривую намагничивания и петлю гистерезиса в относительных единицах. В этом методе не требуется использование дорогостоящих и громоздких магнитометров, так как он основан на анализе фотографий, полученных с использованием камеры и микроскопа.

В рамках решения, поставленной задачи необходимо было: подобрать образец – пленку Vi-содержащего феррита-граната, создать программу для анализа относительной площади доменов с разной намагниченностью, провести измерения периода доменной структуры и ширины доменов с определенной намагниченностью, провести измерения кривой намагничивания образцов на вибрационном магнитометре и сравнить кривые намагничивания, полученные разными методами.

Глава 2. Материалы и методы

2.1 Магнитооптические свойства пленок ферритов-гранатов

Ферриты-гранаты – магнитные диэлектрики с уникальными свойствами. Прозрачность и высокое удельное фарадеевское вращение в видимой области спектра делает эти материалы очень удобными для магнитооптических исследований и демонстраций. [2,3]

Ферриты-гранаты имеют общую формулу $R_3Fe_5O_{12}$, где R – трехвалентный ион редкоземельного металла (Y, Cd, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Yb, Sm, Eu, Tb). Кристаллическая структура изоморфна структуре минерала граната. Ферриты-гранаты получили широкую известность в 60-е гг 20 века, их использовали при создании датчиков магнитных полей, в оптических затворах и в системах для хранения и обработки информации.

Получение ферритов-гранатов в виде эпитаксиальных пленок дает уникальную возможность варьирования химического состава и, как следствие, возможность менять константы материала в широком диапазоне. В частности, размер доменов в зависимости от состава пленки может меняться от 10^{-7} до 10^{-3} м, намагниченность насыщения может меняться более чем на два порядка, а константа одноосной анизотропии – на восемь порядков. Пленки ферритов-гранатов – диэлектрики, которые являются ферримагнетиками. В общем случае в этих материалах принято выделять две подрешетки, одна из которых относится к редкоземельным элементам, а другая – к железу (рис. 1). Намагниченности подрешеток по-разному зависят от температуры (рис. 2), поэтому зависимость суммарной намагниченности от температуры, схематично показанная на рис.3, имеет точку компенсации. Положение точки компенсации сильно зависит от состава пленки (рис. 4). Указанием на то, что редкоземельные ионы достаточно слабо влияют на магнитные свойства ферритов-гранатов, является тот факт, что температура Нееля в этих материалах практически не зависит от входящих в них редкоземельных ионов и составляет 563 ± 15 К (рис. 4).

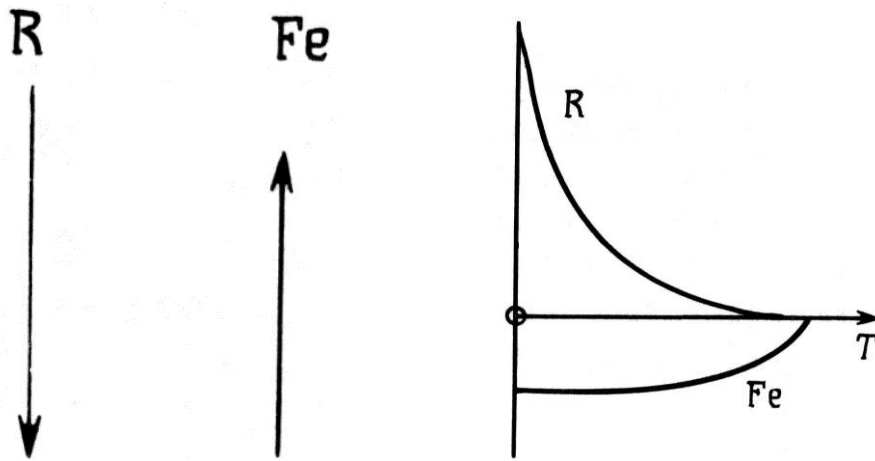


Рисунок 1 - Схематическое изображение намагниченностей подрешеток железа (Fe) и редкоземельных элементов (R)

Рисунок 2 - Схематическое изображение температурной зависимости намагниченностей подрешеток железа и редкоземельных элементов

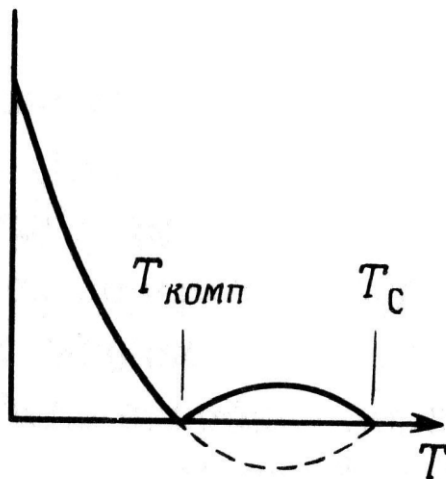


Рисунок 3 - Схематическое изображение температурной зависимости суммарной намагниченности подрешеток

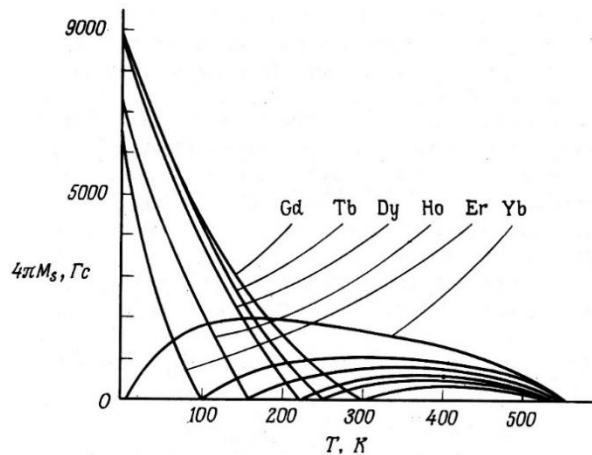


Рисунок 4 - Температурная зависимость намагниченностей некоторых редкоземельных ферритов-гранатов

Пленки ферритов-гранатов выращиваются на прозрачной подложке, ориентация которой определяет ориентацию самой пленки. В настоящей задаче будут использованы пленки с ориентацией (111). В этих пленках наблюдается лабиринтная доменная структура. Период кристаллической структуры подложки должен быть максимально близок к аналогичному параметру пленки. Толщина пленки составляет порядка нескольких мкм, при этом толщина подложки примерно на два порядка больше.

Для наблюдения доменной структуры с помощью эффекта Фарадея материал должен быть прозрачным и обладать достаточно большим удельным фарадеевским вращением. Для магнитооптических исследований обычно используют пленки ферритов-гранатов, содержащие висмут. Этот элемент, с одной стороны, увеличивает удельное фарадеевское вращение (рис. 5), но, с другой, его большая концентрация приводит к уменьшению прозрачности (рис. 6).

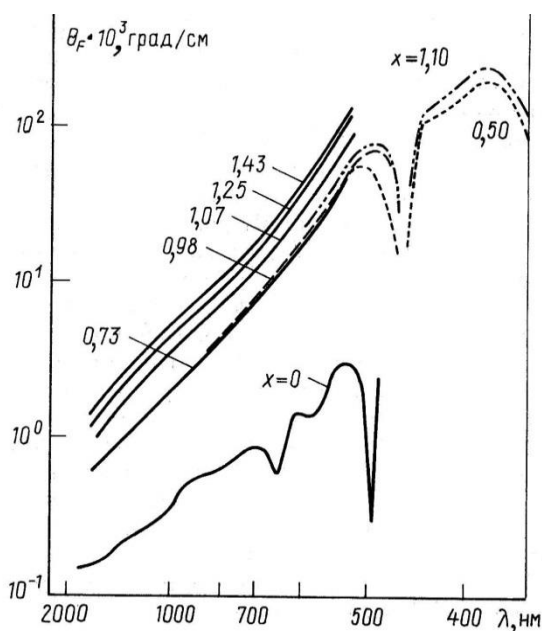


Рисунок 5 - Спектры удельного фарадеевского вращения системы $R_3-x\text{Bi}x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с различным содержанием висмута

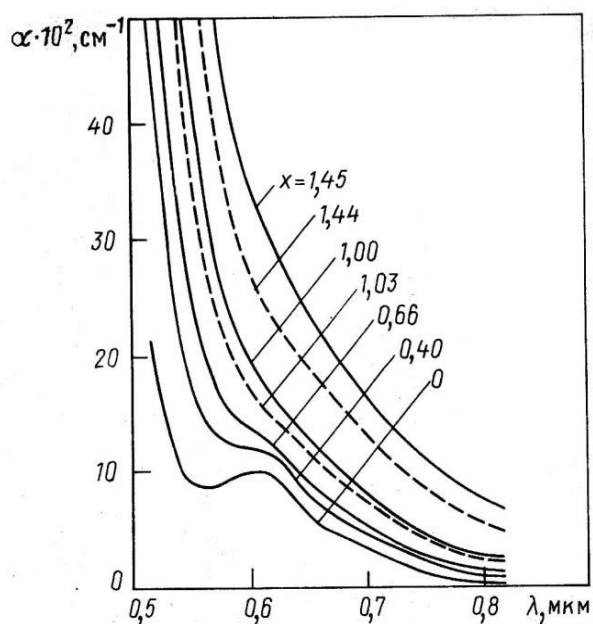


Рисунок 6 - Спектры поглощения системы $\text{Y}_3-x\text{Bi}x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с различным содержанием висмута.

$$I = I_0 e^{-\alpha \cdot z}$$

I_0, I – интенсивность падающего и прошедшего света

2.2 Наблюдение доменной структуры пленки феррита-граната с помощью магнитооптического эффекта Фарадея

В пленке феррита-граната, выращенной на подложке с ориентацией (111), реализуется лабиринтная доменная структура (рис. 7). Направление намагниченности в доменах схематично показано на рис. 8 и 9.

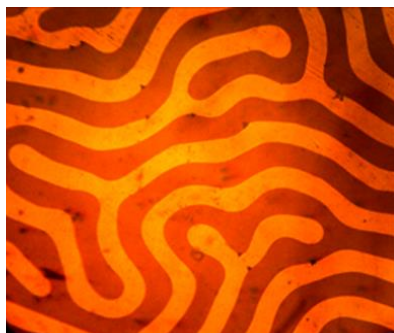


Рисунок 7 - Лабиринтная доменная структура в пленке феррита-граната (период около 100 мкм)

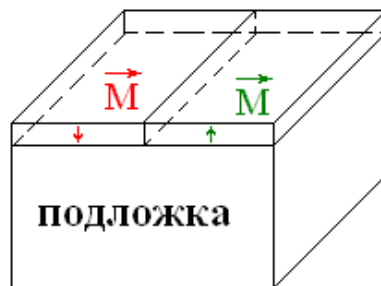


Рисунок 8 - Направление намагниченности в соседних доменах в одноосной пленке

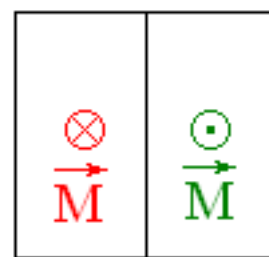


Рисунок 9 - Направление намагниченности в соседних доменах в одноосной пленке. Вид сверху

При прохождении линейно поляризованного света через домены с противоположной намагниченностью плоскость поляризации поворачивается в противоположные стороны на равные углы (красный и зеленый отрезки на рис. 10). Главную ось анализатора выставляют перпендикулярно направлению поляризации света, прошедшего через один из доменов (рис. 10). При такой геометрии свет через этот домен не пройдет, и мы будем видеть его черным. Свет через другой домен пройдет частично, этот домен будет светлее (рис. 11). Такое изображение соответствует контрасту доменов.

Если главные оси поляризатора и анализатора параллельны или скрещены (рис. 11), то интенсивность света, прошедшего через домены с разной намагниченностью одинакова: оба домена или светлые, или темные, видна только граница между ними (рис. 12). Такой контраст называется «контрастом доменных границ». Он обычно используется для исследования динамики процессов перемагничивания, когда важно знать зависит ли ширина доменной границы от скорости ее движения.

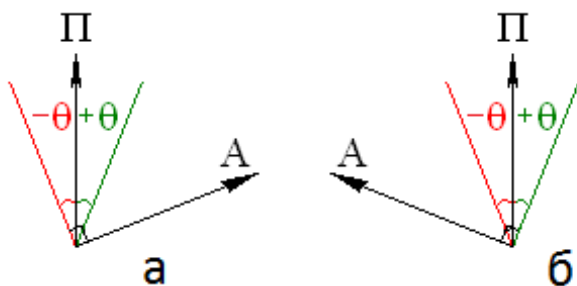


Рисунок 10 - Варианты взаимного расположения главных осей поляризатора и анализатора и поворот плоскости поляризации света, прошедшего через домены с противоположной намагниченностью (контраст доменов)

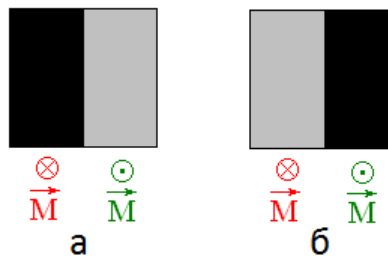


Рисунок 11 - Контраст доменной структуры, полученный при разных взаимных ориентациях главных осей поляризатора и анализатора, показанных на рис. 10

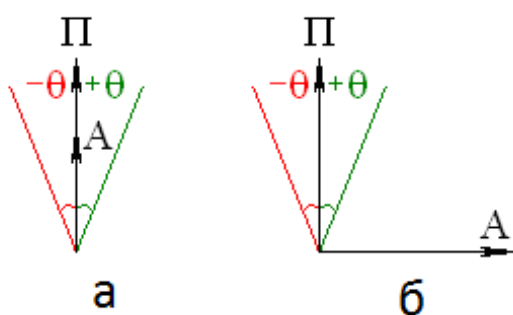


Рисунок 12 - Варианты взаимного расположения главных осей поляризатора и анализатора и поворот плоскости поляризации света, прошедшего через домены с противоположной намагниченностью (контраст доменных границ)

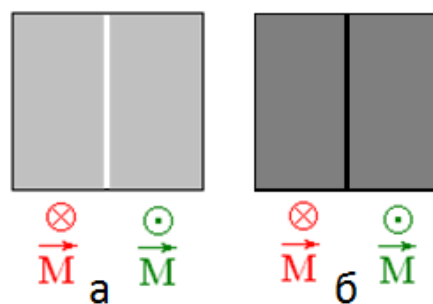


Рисунок 13 - Контраст доменной структуры, полученный при разных взаимных ориентациях главных осей поляризатора и анализатора, показанных на рис. 12

2.3 Экспериментальная установка

Доменную структуру пленки феррита-граната будем наблюдать с помощью эффекта Фарадея, используя поляризационный микроскоп (рис. 15). Намагничивать образец будем с помощью катушек Гельмгольца (постоянная катушек 312 Э/А), используя камеру для микросъемки, будем фотографировать доменную структуру при перемагничивании.

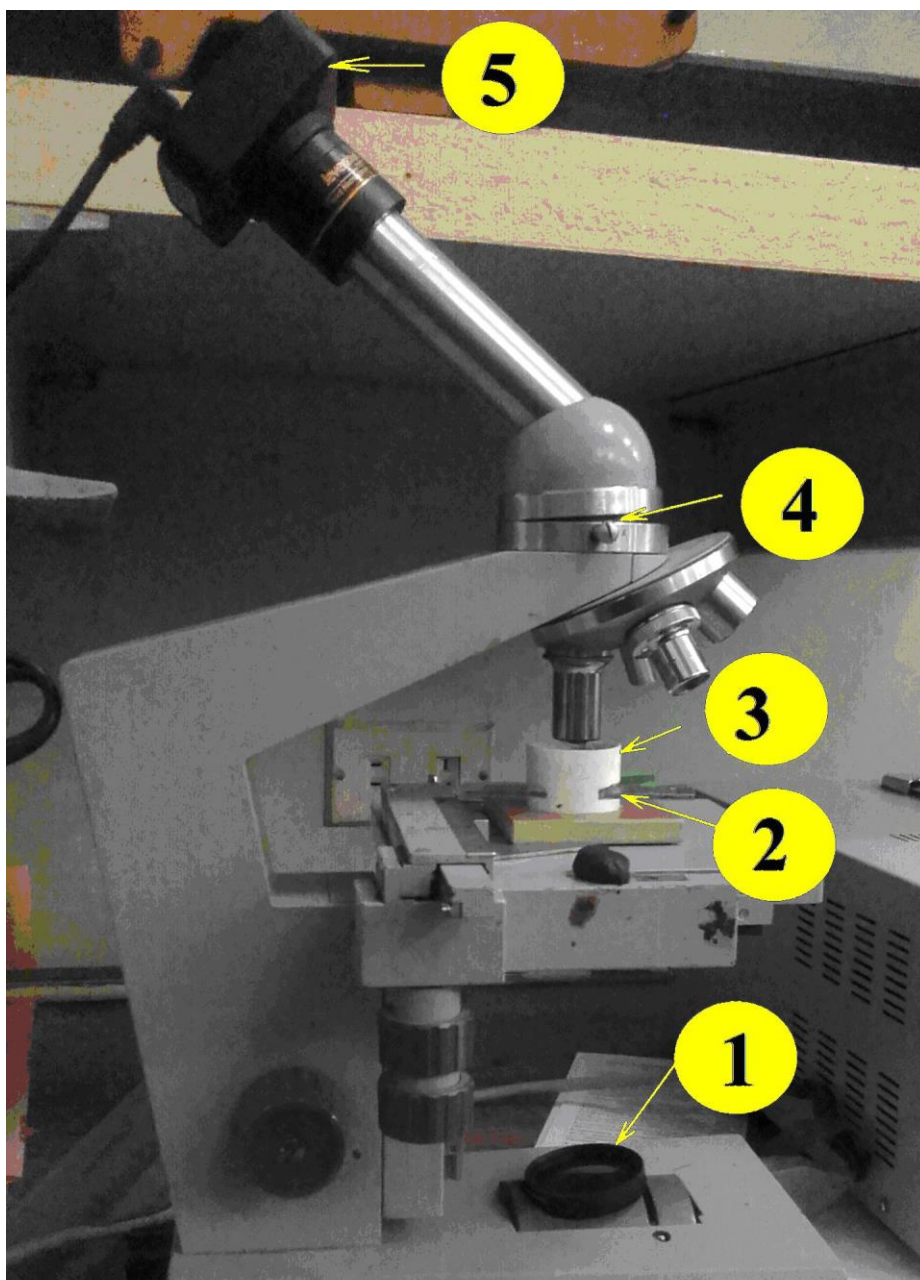


Рисунок 14 - Оптическая часть установки: микроскоп. 1 – поляризатор, 2 – стекло, на котором находится образец, 3 – намагничивающие катушки, 4 – анализатор, 5 – камера для микросъемки

Глава 3. Основная часть

3.1 Работа над контрастом фотографий доменной структуры

Контраст изображения — это отношение яркостей самой светлой и самой тёмной частей изображения. [4] Различают тоновый (тональный) и цветовой контрасты фотографии¹. Первый представляет собой разницу от наиболее темного к наиболее светлому. Он характерен для ахроматических цветов. Такими называют оттенки серого в диапазоне от 0 до 255, то есть черного к белому. Наиболее светлым (ярким) является белый цвет, а наиболее темным — черный (рис. 15).

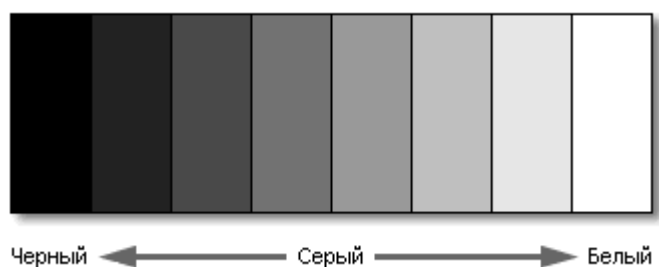


Рисунок 15 - Ахроматические цвета (схема)

Источник: <http://photodzen.com/learn/photo-abc/osnovy-kompozitsii-kontrast/>

В художественной фотографии под тоновым контрастом понимается также намеренное подсвечивание заднего плана и затемнение переднего. Или наоборот. Таким образом, темные и светлые участки изображения сопоставляются между собой так, что картинка начинает передавать объем и глубину пространства. На фотографии создается так называемая тональная перспектива.

Цветовой контраст подразумевает наличие на фотографии противоположных (конкурирующих) цветов. Обычно используют контраст между диаметрально удаленной парой цветов на цветовом круге (рис. 16).

¹ <http://photodzen.com/learn/photo-abc/osnovy-kompozitsii-kontrast/>



Рисунок 16 - Цветовой круг Исаака Ньютона

Источник: <http://photodzen.com/learn/photo-abc/osnovy-kompozitsii-kontrast/>

Цветовой контраст использовать сложнее, чем тональный и цветные фотографии занимают больший объем. Кроме того, цветовой контраст больше подходит для улучшения восприятия фотографии человеком, чем для автоматического четкого выделения границ различных элементов изображения. Поэтому было принято решение изначально снимать фотографии доменной структуры в градациях серого.

Для наиболее точной оценки соотношения площадей темных и светлых доменов на фотографии, необходимо добиться максимального контраста и при этом не изменить границы раздела темных и светлых областей. То есть нужно четко разделить диапазоны тонов, относящихся к доменам с противоположной намагниченностью.

Есть несколько вариантов улучшения контраста фотографии:

- 1) С помощью графических редакторов сделать изображение монохромным, то есть, состоящим только из двух цветов: белого и черного;
- 2) Использовать автоконтраст в программе Adobe Photoshop;
- 3) Подобрать вручную контраст фотографии в графическом редакторе.

Суть первого варианта заключается в том, чтобы оставить только два цвета и после этого определить количество пикселей одного и другого цвета. Метод

очень простой: нужно сохранить фотографию в формате 8 бит bmp. Это можно сделать с помощью графического редактора paint, который по умолчанию установлен в OS Windows. Результат реализации такого метода изображен на рис. 17. Видно, что из-за того, что некоторые участки исходной фотографии в целом получились темными, программа закрасила их в черный цвет, что является неприемлемым. Это подтверждается программой для измерения площадей, которая показывает, что 67 процентов площади фотографии черная и, соответственно 33 – белая. В действительности же это значение должно быть приблизительно равно 50, так как эта фотография сделана в отсутствие внешнего поля.

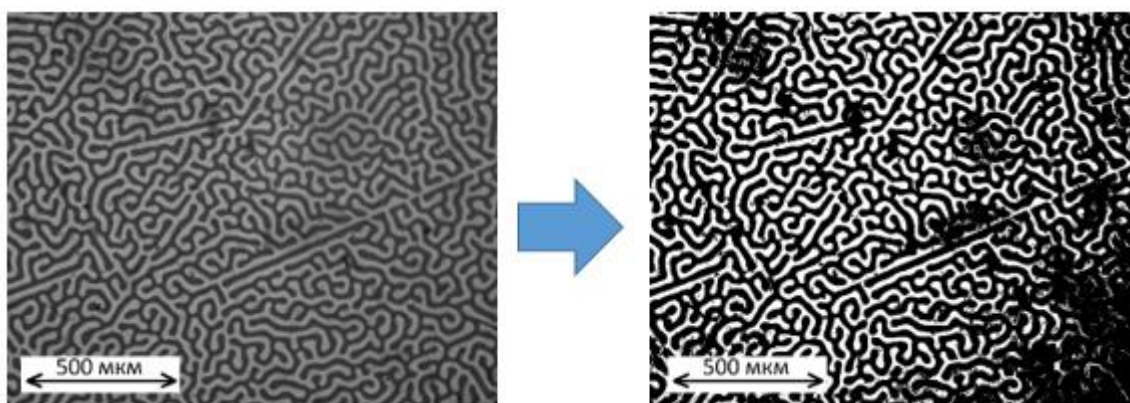


Рисунок 17 - Преобразование фотографии доменной структуры с оттенками серого (а) к монохромному виду (б)

Второй метод повышения контраста изображения, который заключается в использовании автоконтраста в графическом редакторе, показал себя лучше, чем первый, так как визуально темные и светлые участки еще сильнее выделились (рис. 18). Но при расчете площадей различных доменов результаты стали объективно хуже, чем те, которые были получены для исходной фотографии. В целом наблюдается снижение разницы площадей темных и светлых доменов. То есть если изначально разница составляла порядка 90% в момент, когда образец полностью намагничен, то после

использования автоконтраста это значение чуть больше 70%. Таким образом, данный метод тоже не подходит.

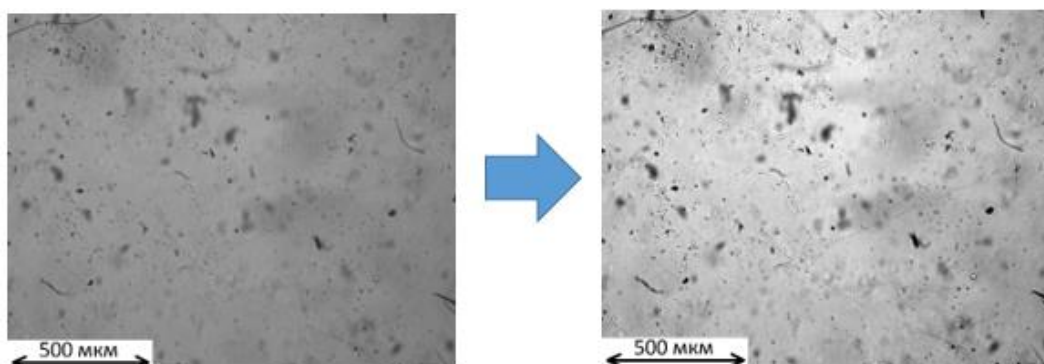


Рисунок 18 - Результат применения автоконтраста (для намагниченного образца)

Третий способ улучшения фотографий заключается в ручном подборе параметров для каждой серии (рис. 19). Этот метод показал себя лучше всего потому, что таким образом можно добиться высокого контраста изображения и при этом те участки фотографий, которые в целом получились темнее или светлее из-за неравномерной освещенности, не влияют на результат измерений относительной площади светлого или темного домена. Для одних фотографий, используя этот метод, удалось увеличить контраст, а для других, такие изменения не потребовались. Это обусловлено тем, что данные, полученные после измерения площадей светлых и темных доменов, соответствовали предположению, что в отсутствие поля, светлые и темные домены занимают примерно одинаковую площадь, а в тот момент, когда образец полностью намагничен, разница площадей должна быть близка к 100%. Из-за наличия дефектов на пленке (которые выглядят на фотографии как темные и светлые точки), результат получается немного меньше.

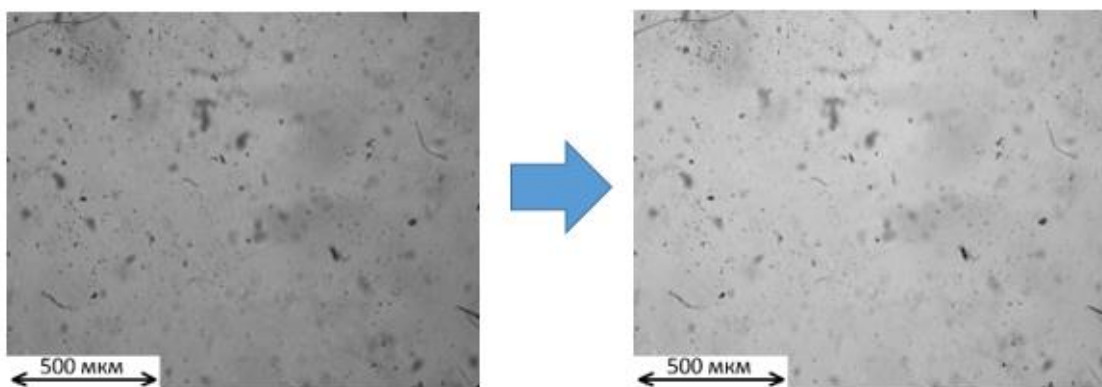


Рисунок 19 - Результат подбора параметров вручную (для намагниченного состояния образца)

Кроме улучшения контраста необходимо было найти способ пакетной обработки изображений, так как обработка серии фотографий по одной занимает много времени. Решение было найдено в программе XnViewMP. Это кроссплатформенная программа для просмотра изображений, поддерживающая просмотр более 400 и сохранение (конвертирование) до 50 различных графических и мультимедийных форматов файлов. Программа распространяется бесплатно для некоммерческого и образовательного использования. XnViewMP по функциональным возможностям не уступает таким известным и популярным средствам просмотра графических форматов, как программы ACDSee и IrfanView².

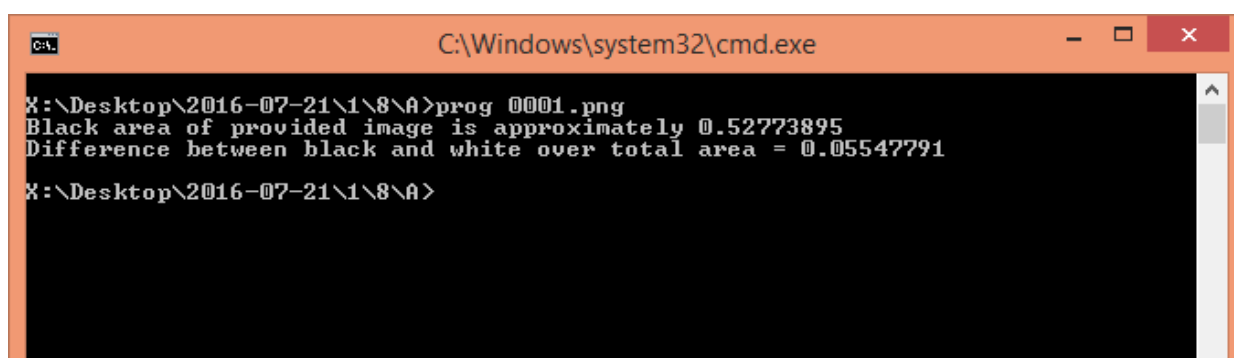
3.2 Использование программы для расчета относительной разности площадей доменов с противоположным направлением намагниченности

В основе всей работы лежит измерение площадей светлых и темных доменов. Эти измерения нельзя провести с помощью обычных графических редакторов, даже таких мощных как Adobe Photoshop. Для этого необходимо подобрать специальную программу.

В качестве первого варианта такой программы, была выбрана простая программа Prog, которая запускается через командную строку, обрабатывает

² <https://ru.wikipedia.org/wiki/XnView>

отдельно каждую фотографию и выдает результат в самом окне (рис. 20). Эта программа хорошо справляется со своей задачей в том случае, когда при намагничивании светлые домены исчезают, и остается только темный домен. Но в процессе работы у данной программы были выявлены три недостатка. Во-первых, результат выводится только в окне программы и его нельзя скопировать. Во-вторых, для получения значений относительных площадей название каждой фотографии необходимо отдельно прописывать в командной строке. В-третьих, программа абсолютно не подходит для обработки серии фотографий, на которых в результате намагничивания образца остается светлый домен. Таким образом, при работе с этой программой обработка результатов занимает достаточно много времени, и метод работает не всегда корректно.



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
X:\Desktop\2016-07-21\1\8\A>prog 0001.png
Black area of provided image is approximately 0.52773895
Difference between black and white over total area = 0.05547791
X:\Desktop\2016-07-21\1\8\A>
```

Рисунок 20 - Интерфейс программы «Prog», используемой для расчета относительных площадей доменов

Так как программа Prog не подходит для работы с большей частью фотографий, было принято решение написать другую программу с увеличенным функционалом и большей эффективностью. Такая программа «Proto» была реализована на языке Python. Это – высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода³.

³ <https://www.python.org>

Суть работы Proto заключается в том, что она получает на вход директорию с фотографиями, сразу обрабатывает все изображения папки и сохраняет результат в отдельный текстовый файл, что очень удобно для работы с полученными данными (рис. 21). Обработка изображений состоит из нескольких этапов. На первом этапе программа повышает контраст, чтобы переход из светлой области в темную был более выраженным. После этого она находит среднее значение яркости пикселя (сумма квадратов компонентов R, G, B), затем сравнивает яркость каждой точки изображения с этим значением и, в зависимости от того, больше оно или меньше чем среднее, относит ее либо к одной категории (светлая область), либо к другой (темная область).

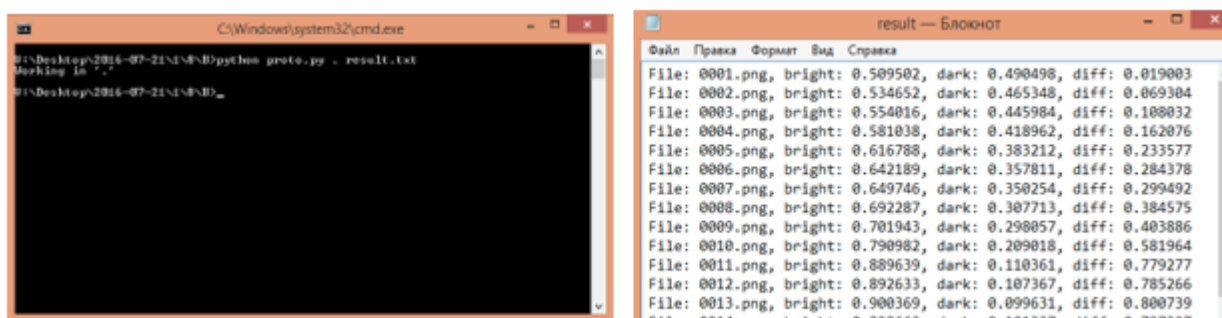


Рисунок 21 - Интерфейс и результат работы программы Proto, используемой для расчета относительных площадей доменов

Несмотря на все преимущества данной программы, у нее тоже есть один недостаток: она не подходит для обработки серии фотографий, на которых преобладает темный домен. В этом случае результат сильно отличается от ожидаемого и того, который выдает программа Prog.

Таким образом, комбинация двух программ позволяет провести обработку всех фотографий: для одних используется программа Prog, для других – Proto. В целом вторая программа гораздо лучше, чем первая, поэтому при выполнении задачи практикума студентам рекомендуется подбирать контраст изображений таким образом, чтобы при намагничивании увеличивалась площадь светлого домена.

3.3 Разность относительных площадей доменов с противоположной намагниченностью для разных участков одного образца

Для получения кривой намагничивания доменную структуру фотографировали на разных участках одного и того же образца (рис. 22). Это необходимо для того, чтобы понять, насколько сильно выбор участка влияет на результат. Кривые намагничивания, полученные на разных участках одного образца, могут отличаться друг от друга из-за наличия локальных и протяженных дефектов, неоднородностей и микроповреждений образца. Одной из задач настоящей работы является выбор из серии пленок ферритов-гранатов такого образца, локальные кривые намагничивания которого отличаются друг от друга меньше всего.

На рис. 22 представлены фотографии доменной структуры разных участков пленки феррита-граната с ориентацией (111). В отсутствие дефектов и неоднородностей в образце наблюдается лабиринтная доменная структура. Наличие областей с полосовой доменной структурой и темных пятен свидетельствует о наличии в образце протяженных дефектов и неоднородностей, которые могут влиять на ход кривой намагничивания.

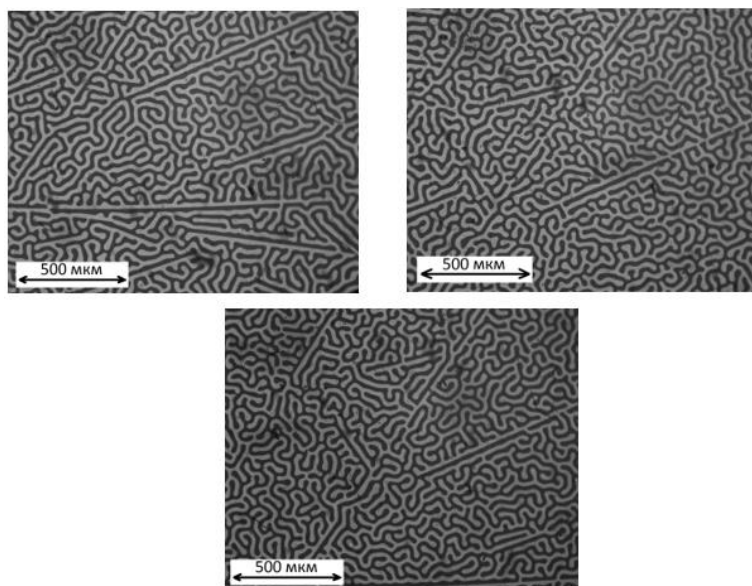


Рисунок 22 - Различные участки одного образца в отсутствие внешнего магнитного поля

Итак, необходимо было рассчитать разность относительных площадей доменов с противоположным направлением намагниченности δ^*

$$\delta^* = |S_b - S_w| \quad (2)$$

где S_b и S_w – относительные площади темных и светлых доменов соответственно. Параметр δ^* вычисляли для каждой фотографии из трех серий, каждая из которых соответствовала отдельному участку образца. Так как первый участок намагничивали таким образом, что светлые домены постепенно исчезали, и в результате оставался только темный домен, расчеты производились с помощью первой программы Prog. Для второго и третьего участков использовали вторую программу Proto, поскольку они намагничивались так, что темные домены исчезали, и оставался только светлый домен. Ранее было показано, что выбор программы зависит от того, какой домен, темный или светлый, остается при намагничивании образца.

При обработке фотографий также нужно было учитывать наличие локальных дефектов в образце, которые выглядят на фотографиях как темные и светлые пятна. На рис. 23 показаны фрагменты фотографий намагниченного образца. В этот момент в пленке остается только один домен: светлый (а, б) или темный (в).

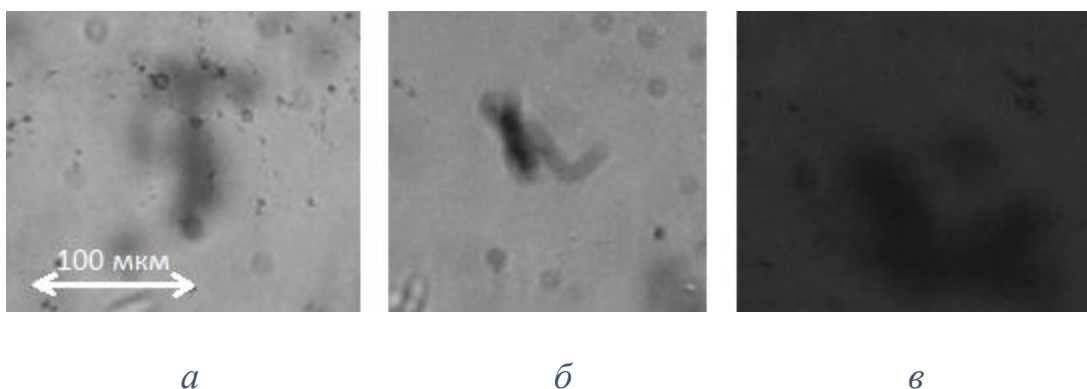


Рисунок 23 – Дефекты на фотографиях намагниченного образца

Очевидно, что наличие темных пятен на фотографиях влияет на результат расчета величины δ^* , когда после намагничивания остается светлый домен. Площадь этого домена, вычисленная программой, уменьшается. Были предприняты попытки учета влияния дефектов в самой программе, но оказалось, что это трудно реализовать. Поэтому было решено сделать это при последующей обработке полученных результатов.

Предполагая, что дефекты равномерно распределены по всему образцу, можно уменьшить их вклад в вычисление площади светлого домена, если к площади последнего прибавлять относительную площадь темных пятен (S_d). Величину S_d можно рассчитать из соображений, что на последней фотографии серии (в момент, когда остается только один светлый домен) отличие разности площадей $|S_b - S_w|$ от 100% заключается только в том, что программа воспринимает темные пятна как фрагмент домена. То есть, умножая суммарную площадь дефектов, расположенных по всему участку, на долю, занимаемую светлым доменом, можно получить поправку к площади последнего при данном значении внешнего поля. В этом случае площадь светлого домена S_w^* можно вычислить по формуле:

$$S_w^* = S_w + S_d \cdot S_w \quad (3)$$

С учетом этой поправки, величина δ имеет вид

$$\delta = |S_b - S_w^*| \quad (4)$$

Зависимости δ от внешнего поля для различных участков образца представлены на рис. 24.

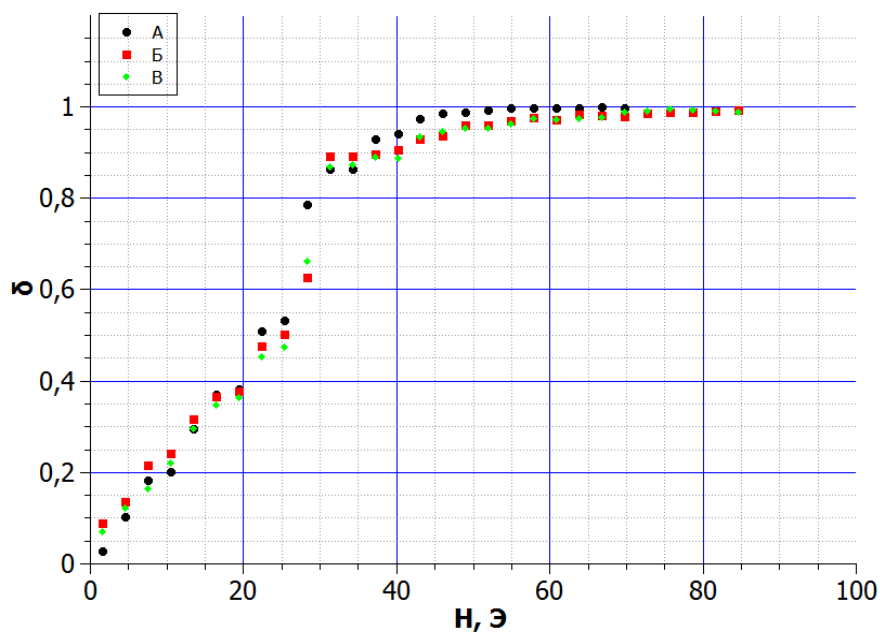


Рисунок 24 - Зависимости разности относительных площадей светлых и темных доменов δ от внешнего поля H для различных участков образца (с учетом наличия дефектов)

Все кривые, представленные на рис. 24, имеют начальный линейный участок, что свидетельствует о том, что намагничивание образца в этой области происходит за счет смещения доменных границ. Поле насыщения составляет порядка 50 Э. В магнитных полях, превышающих эту величину, наблюдается парапроцесс. Из рисунка видно, что δ достигает 1, что подтверждается тем, что на последней фотографии серии имеется только один домен. Так же наблюдается практически полное совпадение кривых, полученных для участков Б и В, и небольшое отличие их от кривой, полученной для участка А. Кривые, представленные на рис.24, показывают, что предположение о равномерном распределении дефектов по поверхности образца оправдано. Кроме того, при оптимальном выборе программы и грамотной обработке полученных результатов локальные кривые намагничивания для одного и того же образца совпадают, независимо от того, темный или светлый домен остается в намагниченном состоянии.

Если бы дефекты не были правильно учтены, мы бы получили несовпадение графиков для случаев намагничивания в светлую (рис. 25 Б, В) и темную область (рис. 25 А).

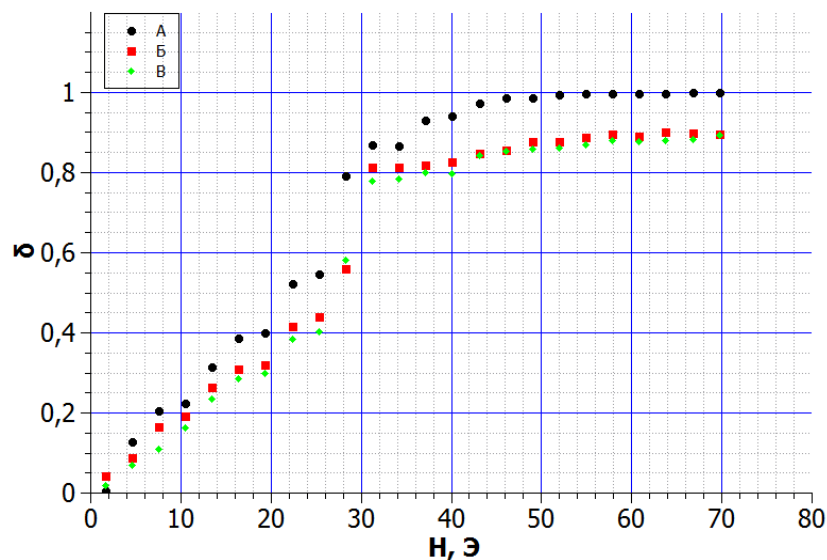


Рисунок 25 - Зависимости разности относительных площадей светлых и темных доменов δ от внешнего поля H для различных участков образца (без учета дефектов)

Таким образом, учет дефектов необходим, если при намагничивании образца растет площадь светлого домена. Это нужно учитывать при обработке результатов и построении кривой намагничивания.

3.4 Зависимость ширины домена и периода доменной структуры от внешнего магнитного поля

Начальный участок кривой намагничивания можно получить не только из анализа параметра δ – разности относительных площадей темных и светлых доменов, но и из анализа зависимости разности относительной ширины доменов от внешнего магнитного поля β .

$$\beta = \frac{|x_b - x_w|}{d} \quad (5)$$

где x_b и x_w – ширина темного и светлого домена соответственно, $d = x_b + x_w$ – период доменной структуры образца.

С помощью специальной программы для каждой фотографии доменной структуры при намагничивании образца измеряли ширину отдельного домена (x_b или x_w) и период доменной структуры (d). Но так как домены имеют сложную форму, и их ширина неодинакова на разных фрагментах фотографии, нужно было проводить несколько измерений на одной фотографии и тщательно выбирать места для измерений. Основные критерии выбора: наличие локальной полосовой структуры и отсутствие сильных утолщений. На рис. 26 показаны участки фотографий, неудобные для измерения ширины домена и периода доменной структуры, так как на них не удастся выделить повторяющиеся фрагменты, удобные для измерений.

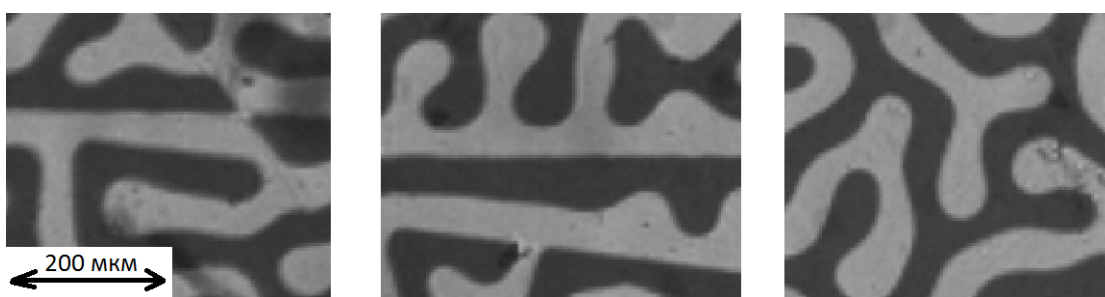


Рисунок 26 - фрагменты фотографий, неподходящие для измерения ширины домена и периода доменной структуры

Стандартные графические редакторы не позволяют проводить измерения, необходимые для данной работы, для этой цели также не подходят простые линейки, которые измеряют только по вертикали и горизонтали. Программа Adobe Photoshop обладает необходимым функционалом, но она довольно тяжеловесная и сильно нагружает систему, поэтому было принято решение использовать альтернативную, более простую программу Gimp 2.

GNU Image Manipulation Program или GIMP («Гимп») — свободно распространяемый растровый графический редактор, программа для создания и обработки растровой графики и частичной поддержкой работы с векторной графикой⁴. Она отлично подходит для работы с изображениями формата PNG

⁴ <https://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP>

и благодаря инструменту «измеритель», можно определить, как длину проводимой линии, так и угол ее наклона. В нашем случае необходима только первая функция.

В данной программе были проведены измерения ширины домена на 5 различных участках каждой фотографии, вычислено среднее арифметическое этих значений и оценена погрешность измерений. Для измерений были выбраны только те участки, на которых домены сохраняют форму и при изменении поля, меняется только их ширина (рис. 27).

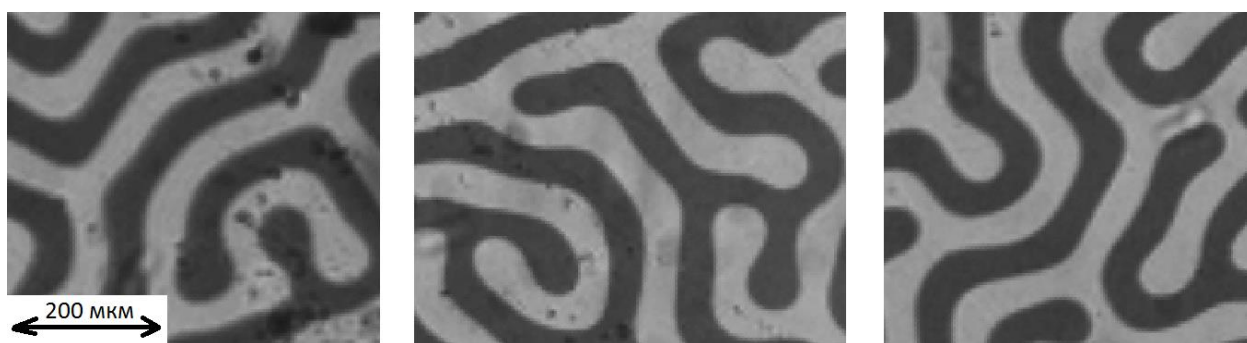


Рисунок 27 - Фрагменты фотографий доменной, удобные для измерения ширины домена и периода доменной структуры

В целях облегчения и ускорения процесса обработки фотографий и исключения «человеческого фактора» была предпринята попытка создания программы, которая бы вычисляла среднее значение ширины домена по всей его длине. Она основана на нахождении минимального расстояния от одной доменной границы до другой. Программа была написана, и считала ширину домена, но полученное значение сильно отличалось от значения, измеренного вручную. Кроме этого при пакетной обработке фотографий некоторые данные не соответствовали общей логике: там, где объективно ожидалось уменьшение ширины определённого домена, программа выдавала совсем неуместные результаты. В связи с этим было принято решение отказаться от использования этой программы.

Для получения кривой намагничивания необходимо было измерить не только ширину домена, но и период доменной структуры. Поскольку кривая намагничивания представляет собой зависимость отношения разности толщин доменов к величине периода структуры от внешнего поля. Необходимо было проверить предположение о том, что период доменной структуры не зависит от поля и участка образца. Для этого были проведены измерения периода на тех фотографиях, где наблюдалась именно доменная структура, а не отдельные домены.

Зависимость периода доменной структуры (d) от внешнего магнитного поля (H), представленная на рис. 28 показывает, что с ростом поля период структуры практически не меняется на разных участках образца. Это подтверждается при построении линейной аппроксимации, угол наклона которой порядка $6 \cdot 10^{-3}$. Так же видно, что период доменной структуры не зависит от участка образца. Таким образом, для получения кривой намагничивания было использовано отношение разности толщин светлых и темных доменов к периоду доменной структуры, вычисленному как среднее арифметическое значений периода на серии фотографий.

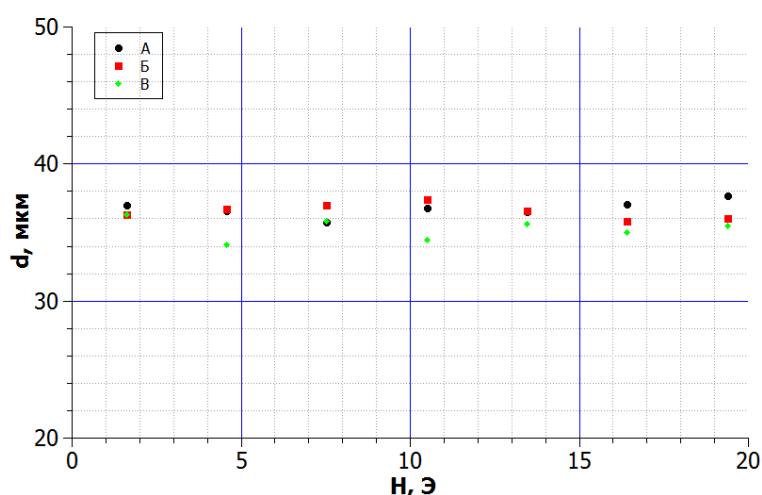


Рисунок 28 - Зависимость периода доменной структуры d от внешнего поля H для трех разных участков образца (A, B и B)

Ширину отдельного домена (x) измеряли вплоть до полного намагничивания образца. Данная операция была проведена также на трех участках образца. Результаты этих измерений – зависимость ширины домена от внешнего поля представлена на рис. 29.

Из графика видно, что ширина домена также не зависит от участка образца, на котором проводились измерения, и с увеличением внешнего поля ширина одного домена уменьшается, исчезая, когда образец полностью намагничен.

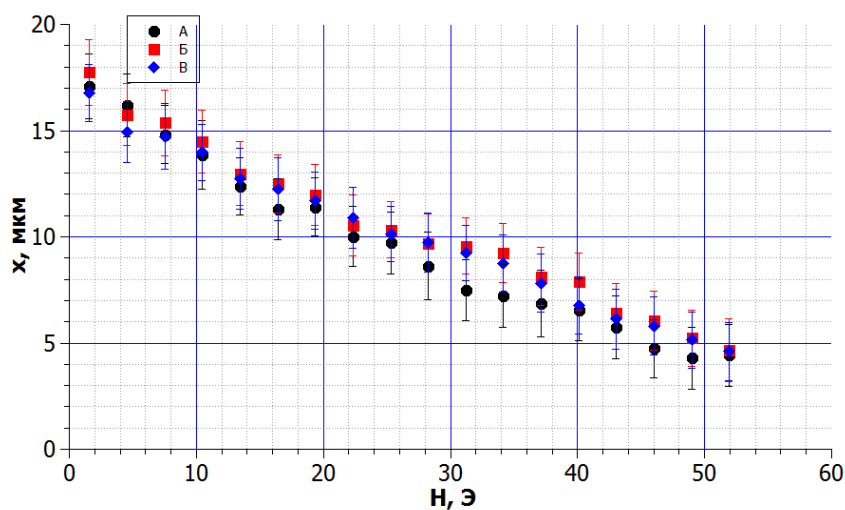


Рисунок 29 - Зависимость ширины домена x от внешнего поля H для трех разных участков образца (A, B и B)

Зависимости разности относительных площадей и относительной разности толщин доменов от внешнего поля показаны на рис. 30. Видно, что эти зависимости практически совпадают.

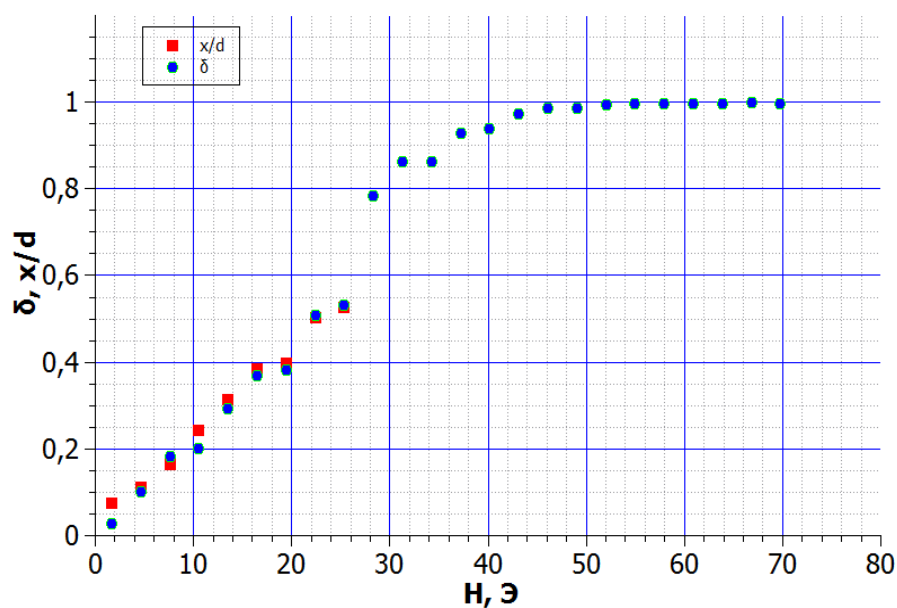


Рисунок 30 - Зависимости разности относительных площадей δ и относительной разности толщин доменов x/d от внешнего поля H

Это значит, что для получения кривой намагничивания можно использовать как измерение относительных площадей, занимаемых темными и светлыми доменами, так и измерение относительной ширины доменов. Правда в первом случае можно получить всю кривую намагничивания, а в другом только ее часть из-за невозможности измерения периода в полях выше 26 Э, когда форма и распределение доменов сильно меняются.

3.5 Выбор образца

Для корректного выполнения студентами задачи практикума, из серии образцов нужно было выбрать наиболее подходящий для измерений. Все образцы – пленки висмут-содержащего феррита-граната с ориентацией (111), выращенные на подложке из гадолиний-галлиевого граната (рис. 31). Отличия между образцами заключаются в их форме, количестве дефектов на единицу площади, магнитооптической добротности и периоде доменной структуры. Для наших измерений особенно важны второй и третий параметры.

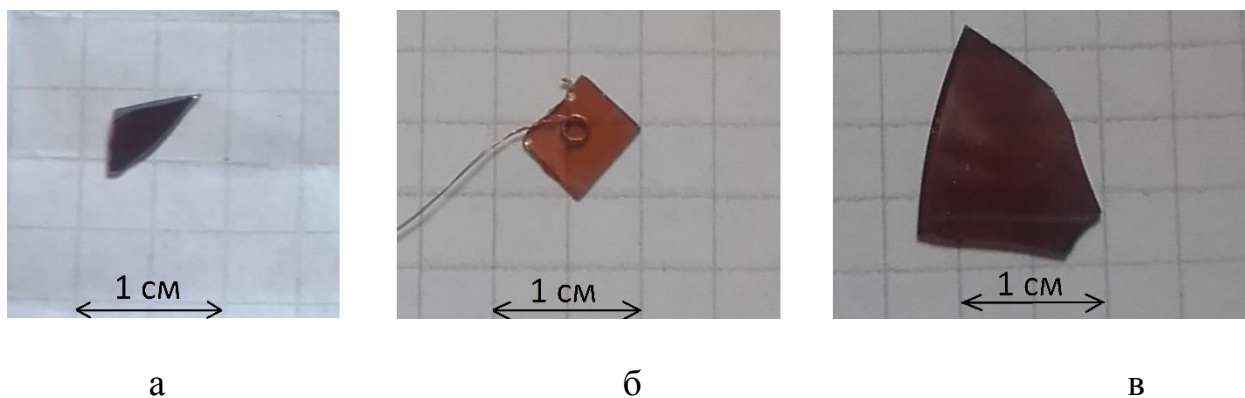


Рисунок 31 - Общий вид исследуемых образцов: а – образец 1, б – образец 2, в – образец 3

Важную роль при измерении разности относительных площадей играет количество дефектов на образце, так как от этого зависит результат работы программы. Если на образце слишком много дефектов, то программа будет ошибочно относить их к области темного домена. Кроме этого, сместится среднее значение яркости пикселей, что также влияет на расчет относительных площадей.

Для более корректного сравнения образцов, были сделаны серии фотографий трех разных участков каждого образца. Чтобы получить информацию о количестве дефектов на образце, нужно изучить фотографии, сделанные в тот момент, когда образец намагничивается, и в нем остается только один домен. На поверхности первого образца наблюдается относительно небольшое количество дефектов на всех трех участках (рис. 32). Это подтверждается результатами работы программы для расчета относительной площади. Расчет показывает, что разность относительных площадей достигает более 90%. Это означает, что на данных участках дефекты занимают менее 5% от общей площади.

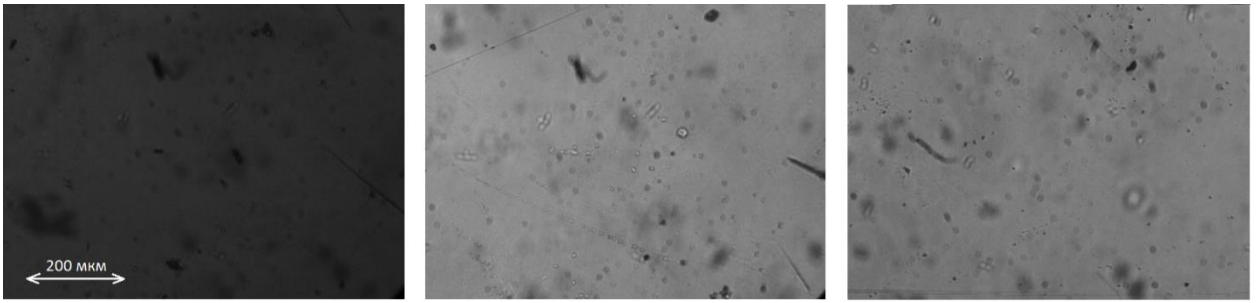
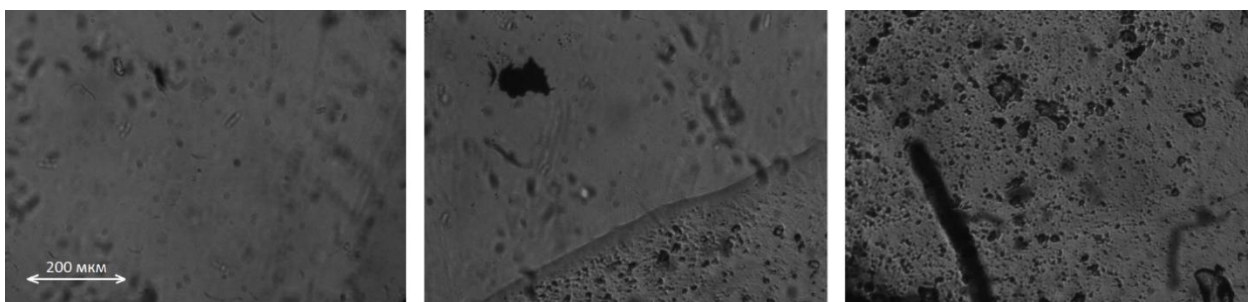


Рисунок 32 - Различные участки 1 образца

На втором образце существуют области, которые совсем не подходят для проведения измерений, так как они сильно повреждены (рис. 33 б, в) и из их анализа нельзя получить точную информацию об ориентации намагниченности в доменах. Метод подсчета количества точек изображения занимаемых каждым из доменов, дает плохие результаты, так как существует большое количество участков, которые на протяжении всех серии фотографий остаются темными.

В этом образце есть и неповрежденные участки, однако их площадь невелика, и в целом количество дефектов в этой пленке достаточно большое. Это видно на фотографии (рис. 33 а) и подтверждается результатами работы программы для вычисления относительной площади. Согласно расчетам, на фотографии более 8% занимают дефекты. Следовательно, первый образец лучше подходит для работы, чем второй.



а

б

в

Рисунок 33 - Различные участки 2 образца

Третий образец по количеству дефектов занимает промежуточное положение между первым и вторым (рис. 34). Согласно расчетам, дефекты занимают около 6-7% его площади. На разных участках этого образца примерно одинаковое распределение дефектов по поверхности, что отличает данный образец от второго.

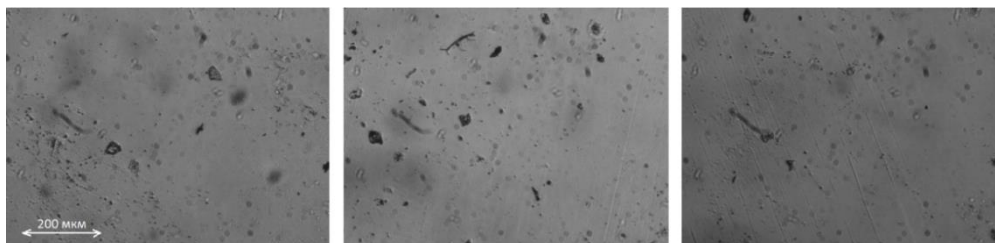


Рисунок 34 - Различные участки 3 образца

Кривые намагничивания образцов 1 и 3, полученные с помощью вычисления относительных площадей, очень близки друг к другу и отличаются от кривой намагничивания для 2 образца (рис. 35). Данные кривые построены с учетом наличия дефектов, поэтому все стремятся к 1 при насыщении, но при этом в начальный момент времени величина относительной разности площадей отличается от 0. Для второго образца кривая намагничивания начинается выше, потому что в начальный момент времени один из доменов занимает большую площадь, чем второй. Это подтверждается измерениями периода и ширины домена.

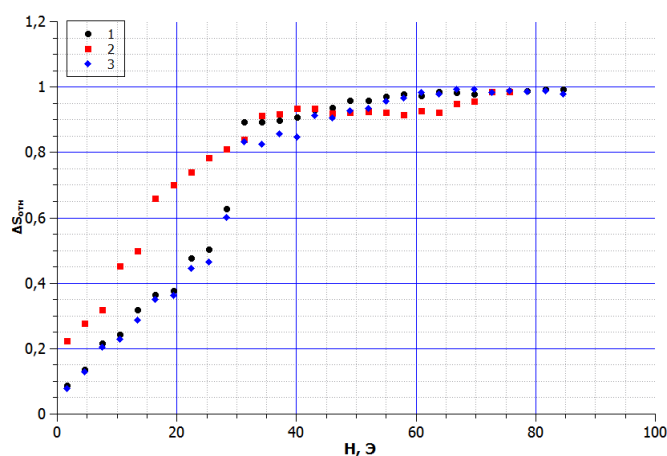


Рисунок 35 - Кривые намагничивания для трех образцов

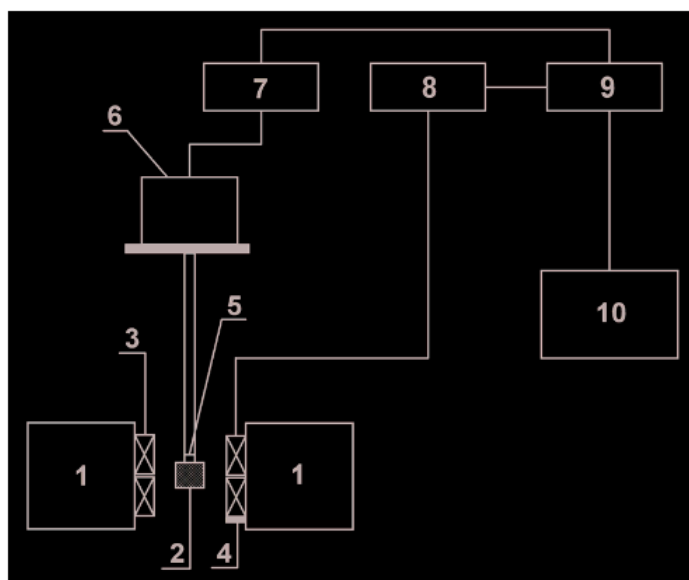
Кроме разного количества дефектов на единицу площади, данные образцы отличаются по магнитооптической добротности. Это параметр зависит от прозрачности и величины удельного фарадеевского вращения. Данные факторы имеют большое значение, потому что от этого зависит контраст доменов на фотографии. При прохождении линейно поляризованного света через домены с противоположной намагниченностью плоскость поляризации поворачивается в противоположные стороны на равные углы. Если сумма углов близка к 90 градусам, мы получим максимальный уровень контраста при выставлении главной оси анализатора перпендикулярно направлению поляризации света, прошедшего через один из доменов. Если же сумма углов близка к 0 или 180 градусов, то часть света, прошедшая через анализатор будет слишком маленькой и фотографии получатся темными. Контраст будет очень низким и это затруднит процесс программного разделения пикселей по уровню яркости.

Фотографии участков второго образца получаются наименее контрастными. У 1 и 3 образцов контраст примерно одинаковый, что позволяет нам с учетом полученных кривых намагничивания и оценки количества дефектов на единицу площади, прийти к выводу, что оба образцы пригодны для использования при выполнении задачи практикума.

3.6 Сравнение с кривой, полученной на вибрационном магнитометре

Для оценки точности описанного выше метода необходимо было провести измерения кривой намагничивания образцов на вибрационном магнитометре. Его принцип действия основан на измерении магнитного поля, создаваемого образцом, который колеблется в однородном магнитном поле. Вибрации образца вызывают изменение магнитного потока, что приводит к возникновению электродвижущей силы в приёмных катушках.

Блок - схема вибрационного магнитометра приведена на рис. 36.



1. Электромагнит
2. Образец
3. Приемные катушки
4. Датчик Холла
5. Термопара
6. Вибратор
7. Генератор низкочастотных колебаний
8. Усилитель
9. Синхронный детектор
10. Персональный компьютер

Рисунок 36 - Блок - схема вибрационного магнитометра

Исследования, как правило, проводятся в однородных магнитных полях, создаваемых электромагнитом (1) или соленоидом (в том числе сверхпроводящим). Образец (2) совершает гармонические колебания, которые создаются генератором механических колебаний (вибратором) (6), на который подаётся напряжение от низкочастотного генератора (7).

Переменный сигнал, амплитуда которого пропорциональна магнитному моменту исследуемого образца, усиливается в селективном усилителе (8), величина амплитуды определяется с помощью синхронного детектора (9), полученный сигнал оцифровывается и через интерфейсную систему подается в персональный компьютер (10). В измерительной цепи находятся датчик измерения магнитного поля (датчик Холла (4)) и датчик измерения температуры (термопара (5)). Последний подключается, если имеется возможность оснастить магнитометр температурной приставкой для проведения измерений в широком диапазоне температур [5].

Точность изменения величины магнитного поля на используемом магнитометре – 0,1 Э, а величины магнитного момента – 10^{-5} ему (1 ему = 1 Гс · см³). Это значит, что полученные значение магнитного момента при

данной величине поля имеют высокую точность и можно считать кривую, снятую на вибрационном магнитометре, эталонной и оценить точность оптического метода, сравнив полученные на разных установках кривые намагничивания.

Измерения кривой намагничивания на вибрационном магнитометре были проведены на втором и третьем образцах. На рис. 37 изображены кривые намагничивания двух образцов. Видно, что они имеют различные поля насыщения, так как у них отличается состав.

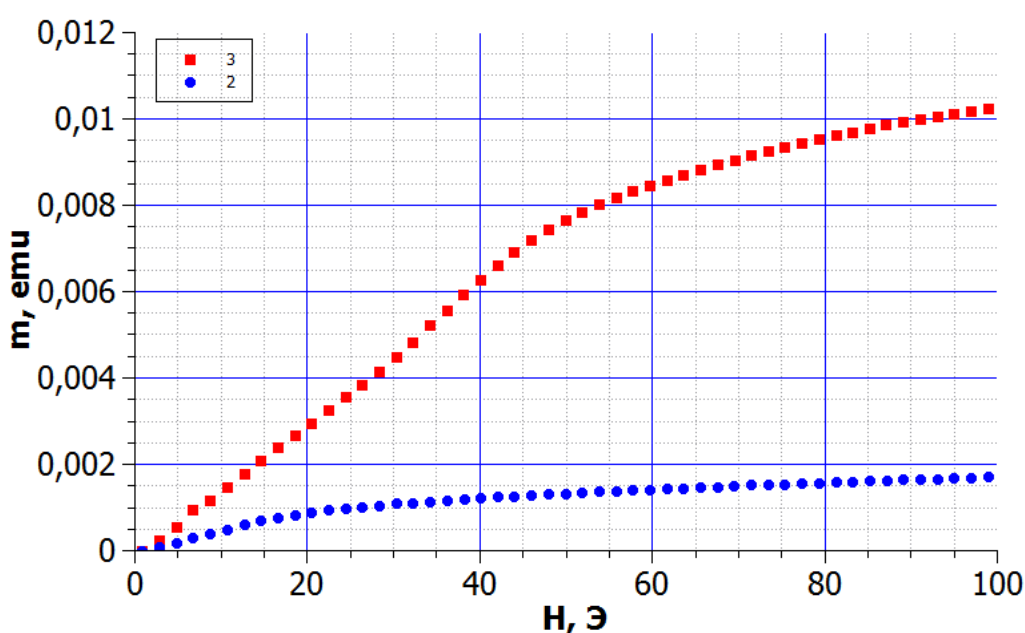


Рисунок 37 - Кривые намагничивания для образцов 2 и 3, полученные на вибрационном магнитометре

В оптическом методе мы получаем данные об относительной намагниченности пленки феррита-граната, и на результат не влияет подложка, так как она является прозрачной. В случае же измерений на магнитометре, результат зависит также от подложки и штока, на котором закреплен образец при измерении. Магнитный момент штока на 3 порядка меньше чем у образца. Учитывая, что объем подложки значительно больше пленки, можно предположить, что кривая, полученная на магнитометре продолжает расти в поле более 50 Э из-за вклада подложки.

Если сравнить две кривые полученными разными методами (рис. 38 и 39) для 3 образца, можно заметить начальный линейный участок в обоих графиках, что свидетельствует о характере перемангничивания за счет движения доменных границ.

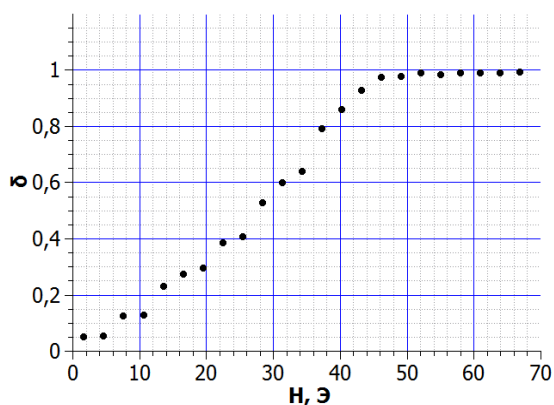


Рисунок 38 - Кривая намагничивания образца 3, полученная оптическим методом

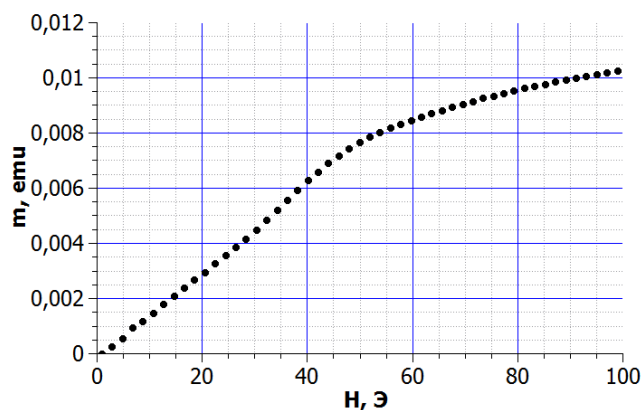


Рисунок 39 - Кривая намагничивания образца 3, полученная на вибрационном магнитометре

На рис. 3 видно, что поле насыщения пленки порядка 50 Э. Именно при такой величине поля на кривой, снятой на магнитометре (рис. 39) наблюдается излом. Таким образом, можно утверждать, что разные методы дают близкие величины поля насыщения пленки. Если нормировать кривую, полученную на магнитометре, на значение момента на изломе кривой, мы получим совпадение линейных участков обеих кривых намагничивания (рис. 40).

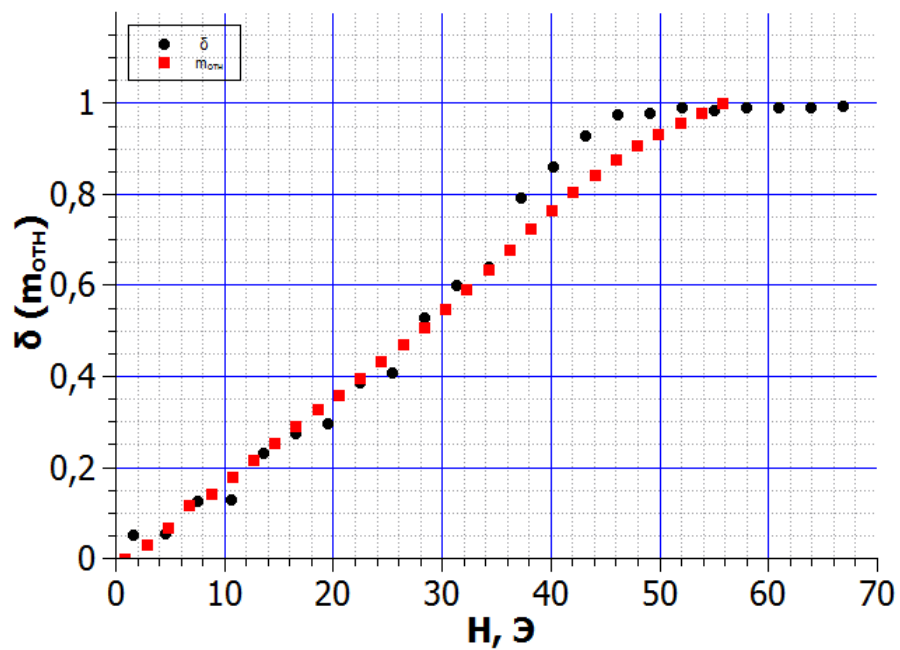


Рисунок 40 - Сравнение кривых намагничивания, полученных разными методами

Таким образом, зная намагниченность насыщения, можно получить оценку восприимчивости по начальному участку кривой намагничивания, полученной оптическим методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках подготовки новой задачи спецпрактикума кафедры магнетизма необходимо было разработать методику получения кривой намагничивания и петли гистерезиса по анализу фотографий доменной структуры при перемагничивании и изучить серию образцов для того, чтобы выбрать наиболее подходящий для данной работы. Из трех образцов разного состава, формы и разной магнитооптической добротности был выбран образец №1, имеющий наименьшее количество дефектов на единицу площади и высокий контраст доменной структуры. Зависимости разности относительных площадей темных и светлых доменов от внешнего поля по сути являются кривыми намагничивания. Сравнение этих кривых для разных участков данного образца (рис. 24) позволило понять, что вид кривой не зависит от выбранного участка (если он не поврежден).

Это утверждение верно в том случае, если при обработке результатов будет учтено распределение дефектов на поверхности образца. В противном случае мы получим несовпадение кривых для серий фотографий, на которых происходит увеличения площади светлого домена в процессе намагничивания и противоположных, когда при намагничивании остается только темный домен.

Кроме выбора образца, необходимо было подобрать оптимальный метод увеличения контраста, который позволит получить более точные результаты. Самый простой способ увеличения контраста — это преобразование фотографий в монохромный формат. То есть формат, при котором остаются только два цвета: черный и белый. Но данный метод не подходит для нашей задачи, потому что после такой обработки в черный цвет закрашиваются некоторые участки светлого домена. Это происходит из-за того, что на фотографии есть области, которые в целом получились темнее из-за неравномерной освещенности.

Второй метод, который был использован для улучшения контраста – это опция автоконтраст в пакете Adobe Photoshop. Суть метода заключается в использовании соответствующего инструмента в графическом редакторе для увеличения контраста фотографий. Данный способ приемлем, но подходит не для всех случаев.

Последний метод увеличения контраста заключается в ручном подборе параметров фотографий. Этот способ наиболее гибкий и поэтому во многих случаях можно улучшить контраст именно таким образом. Но есть фотографии, контраст которых является удовлетворительным для работы, в этом случае обработка в графическом редакторе не нужна.

Для расчета разности относительных площадей доменов с противоположной намагниченностью необходимо было подобрать способ обработки в графическом редакторе или найти программу, которая бы справилась с этой задачей. После многократных попыток извлечь точную информацию о распределении уровней яркости на фотографии с помощью графического редактора, было решено, что данный метод не подходит для нашей задачи. С помощью гистограммы, которую легко получить, рассчитать разность относительных площадей нельзя.

Для обработки всех фотографий (как тех, на которых преобладает светлый домен, так и тех, на которых большую площадь занимает темный) необходимо использовать две специальные программы. Одна из них – «Prog», имеет ограниченный функционал, но хорошо справляется с поставленной задачей при расчете разности относительных площадей доменов, если на фотографии преобладает темный домен. Вторая – «Proto», написанная при выполнении данной работы, более удобная в использовании и работает намного точнее и быстрее, если на фотографиях большую площадь занимает светлый домен. Таким образом, использование комбинации двух программ при расчете относительной разности площадей дает наилучший результат.

Кривую намагничивания можно получить оптическим методом не только рассчитав разность относительных площадей доменов с противоположной намагниченностью, но и измерив ширину домена и период доменной структуры. Кривые, полученные двумя разными способами, практически совпадают (рис. 30). Это значит, что в отсутствие специальной программы для расчета относительной разности площадей доменов, можно воспользоваться способом основанном на получении зависимости относительной ширины домена от внешнего поля. Но таким способом получается только начальный линейный участок кривой намагничивания, так как при больших полях доменная структура теряет периодичность. Также важным моментом в этих измерениях является то, что, проводя измерение периода, студент получает четкое представление о размере доменов в используемых материалах.

Для подтверждения целесообразности использования оптического метода получения кривой намагничивания, было проведено сравнение полученных результатов с данными, полученными на вибрационном магнитометре (рис. 38, 39).

Кривая, полученная на магнитометре, не выходит на насыщение из-за того, что в этом случае измеряется магнитный момент всего образца, состоящего не только из пленки феррита-граната, но и подложки. Но по графикам видно, что поле насыщения на рис. 38 совпадает с точкой, в которой происходит излом кривой на рис. 39. Таким образом, можно утверждать, что разные методы дают близкие величины поля насыщения пленки. Кроме этого, в обоих случаях наблюдается начальный линейный участок, свидетельствующий о характере перемагничивания за счет движения доменных границ.

ВЫВОДЫ

Целью настоящей работы было создание новой задачи спецпрактикума кафедры магнетизма. В процессе работы была разработана методика получения кривой намагничивания и петли гистерезиса на основе анализа фотографий доменной структуры пленки феррита-граната. Согласно этой методике:

1. Перед началом фотосъемки необходимо так сориентировать поляризатор и анализатор, чтобы при намагничивании в образце оставался светлый домен. В этом случае фотография намагниченного образца позволит получить информацию о распределении дефектов на его поверхности. Это следует учитывать при дальнейшей обработке фотографий.
2. По окончании фотосъемки рекомендуется улучшить контраст фотографий. Это можно сделать разными способами, например, в пакете Adobe Photoshop, используя опцию «автоконтраст» или подбирая контраст вручную.
3. Для получения значений относительных площадей доменов с разными направлениями намагниченности можно использовать или программу Prog или программу Proto в зависимости от того, светлый или темный домен преобладает при намагничивании.
4. По окончании измерений следует выполнить корректировку найденных относительных площадей доменов с противоположными направлениями намагниченности с учетом распределения дефектов на поверхности образца. После этого необходимо построить зависимость разности относительных площадей доменов от величины внешнего магнитного поля.
5. Начальный участок кривой намагничивания можно получить при измерении разности размеров доменов с противоположной

намагниченностью, нормированной на период доменной структуры, в зависимости от внешнего поля.

- б. Совпадение зависимостей разности относительных площадей доменов с разной намагниченностью и относительных размеров таких доменов как функций внешнего поля является критерием качественного выполнения задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. Издательство Московского Университета, 1985.
2. Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. Москва: Энергоатомиздат, 1990.
3. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов. Москва: Мир, 1983
4. Л.Ф.Артюшин. Контраст фотографического изображения // Фотокинетика: Энциклопедия / Главный редактор Е.А. Иофис.— М.: [Советская энциклопедия](#), 1981
5. Перов Н. С., Родионова В. В., Прудникова М. В., Грановский А. Б., Прудников В. Н. Вибрационный магнитометр. Москва: физический факультет МГУ им М. В. Ломоносова. 2016.