

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Высоких Юрий Евгеньевич

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ МЕТОД В СОСТАВЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ
МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ И
ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Специальность: 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук (ФГБУН НТЦ УП РАН).

Научный руководитель: **Шевяков Василий Иванович,**
д.т.н., профессор института интегральной электроники
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»

Научный консультант **Краснобородько Сергей Юрьевич**
к.т.н., с.н.с. ФГБУН НТЦ УП РАН

Официальные оппоненты: **Бармина Екатерина Владимировна,**
д.ф.-м.н., зав. лаб., ФГБУН Федеральный
исследовательский центр «Институт общей физики им.
А.М. Прохорова Российской академии наук»

Павлов Илья Николаевич
к.т.н., доцент Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация: ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский
центр Уральского отделения Российской академии наук»

Защита состоится «27» декабря 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01) на базе ФГБУН НТЦ УП РАН по адресу: 117342 Москва, ул. Бутлерова, 15, в конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН и на сайте <http://ntcup.ru/zashhita-dissertacij/>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01),
к.т.н.



В.И. Батшев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время тонкопленочные ферромагнитные материалы (толщина активного слоя от 100 нм до 1 мкм) являются основой оптоэлектроники и магнитооптики, на их базе создаются магнитооптические датчики, модуляторы, фильтры, дефлекторы, затворы, вентили, циркуляторы, оптроны, элементы памяти, устройства топографирования пространственно неоднородных магнитных полей, устройства терромагнитной записи информации [1–6].

Исследования ферромагнитных тонких пленок и многослойных систем на их основе позволяют изучить влияние различных параметров технологического процесса, структуры, химического состава подложки и осаждаемых слоев, способов обработки поверхности на магнитооптические параметры изделия [7–10]. Приборы и методы исследования тонкопленочных магнитных материалов нуждаются в постоянном совершенствовании в связи с развитием технологических возможностей создания таких объектов. Размеры доменной структуры с периодичностью всего в десятки нанометров и шероховатостью поверхности в единицы нанометров требуют создания приборов и методик, способных работать как в макро-масштабе, так и в нанометровом диапазоне. Изучение доменной структуры тонких пленок различного состава и структуры, а также изучение динамики изменения этой доменной структуры при внешнем воздействии, является одной из основных задач при создании новых эффективных магнитооптических тонкопленочных материалов.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) – один из важнейших инструментов исследования магнитной доменной структуры материалов и их топографии с высоким пространственным разрешением [11]. Магнитно-силовая микроскопия (как один из методов АСМ) требует использования магнитного кантилевера, что осложняет измерение доменной структуры образца в виду возможного воздействия кантилевера на магнитную структуру, а также затрудняет проведение измерений с нагревом образца и с высокими значениями внешнего магнитного поля [12]. Магнитооптические (МО) методы изучения доменной структуры широко применяются с середины XX века и по настоящее время, что обусловлено целым рядом причин, в том числе: простотой использования, возможностью наблюдать динамику изменения доменной структуры и возможностью работать во внешнем магнитном поле [13,14]. Однако использование данного метода осложняется невысокой разрешающей способностью, ограниченной оптическим дифракционным пределом. Требуется создание методов и средств, обеспечивающих субдифракционное, нанометровое разрешение.

Комбинация методов магнитооптики и АСМ дает, за счет оптической регистрации доменной структуры, существенные преимущества перед отдельным использованием данных методов: а) возможно одновременное определение топографии поверхности и доменной структуры; б) достижимое пространственное разрешение при определении доменной структуры превышает дифракционный предел оптической микроскопии; в) исключается влияние на магнитную структуру образца магнитного поля кантилевера, используемого в классической МСМ [15,16].

В методах, сочетающих магнитооптику и атомно-силовую микроскопию, существенное значение имеют характеристики используемых апертурных кантилеверов (кантилеверы с отверстием для пропускания света) – повышение разрешающей способности комбинированного метода напрямую зависит от минимизации диаметра апертуры кантилевера с сохранением его высокой оптической пропускной способности

[17]. Поэтому представляется перспективным совершенствование кантилеверов и дальнейшее развитие методик измерения, основанных на комбинации методов магнитооптики и силовой микроскопии, с целью улучшения достижимых характеристик. А для расширения области применимости развиваемого оптического метода регистрации доменной структуры на оптически непрозрачные образцы представляется важным разработка вспомогательного метода создания прозрачных магнитных реплик исходного образца.

Критически важным, для создания бездефектной функциональной структуры, в многослойных магнитооптических системах является низкая шероховатость поверхности отдельных слоев при сохранении высокой магнитооптической активности [9,10,18,19]. Требуется изучение влияния кристаллизационного отжига, как одного из ключевых технологических процессов, на параметры шероховатости/дефектности поверхности и функциональные свойства пленок. Миниатюризация устройств, перспектива использования магнитооптических тонких пленок в технологических процессах микроэлектроники требуют совершенствования технологии процесса создания таких пленок, в том числе представляет интерес создание феррит-гранатовых тонких пленок на негранатовых (кремниевых) подложках, в этом случае критическим является использование переходного слоя и подбор параметров кристаллизационного отжига с целью уменьшения дефектности структуры и шероховатости поверхности.

Цель работы. Разработка комплекса методов измерений характеристик тонких пленок ферритмагнетиков с расширенными функциональными возможностями на основе сочетания магнитооптики и атомно-силовой микроскопии и апробация этих методов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи.

1. Разработка и апробация магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии, обеспечивающего предварительную верификацию доменной структуры прозрачных пленок ферритмагнетиков, без использования кантилевера.

2. Разработка и апробация комбинированного метода магнитооптической микроскопии и АСМ, обеспечивающего одновременное определение топографии поверхности и доменной структуры прозрачных пленок ферритмагнетиков с высоким пространственным разрешением, с использованием немагнитного апертурного кантилевера.

3. Усовершенствование и апробация кантилеверов с оптической апертурой, обеспечивающих повышение разрешающей способности оптического метода регистрации магнитной структуры в составе атомно-силовой микроскопии.

4. Разработка метода исследования доменной структуры непрозрачных ферритмагнитных образцов путем создания их прозрачных реплик из тонких пленок ферритмагнетиков.

5. Исследования магнитных, оптических, структурных и морфологических свойств перспективных феррит-гранатовых тонких пленок, синтезированных методами реактивного ионно-лучевого распыления и отжига.

6. Исследования магнитных, оптических, структурных и морфологических свойств двухслойных тонких пленок ферритмагнетиков, перспективных для создания многослойных магнитооптических устройств и фотонных кристаллов.

Научная новизна

1. Разработан и апробирован комплекс методов, объединяющий технологии магнитооптической микроскопии и атомно-силовой микроскопии и позволяющий

- одновременно исследовать топографию и магнитную доменную структуру прозрачных пленок ферритмагнетиков
- без риска обратного влияния измерительной системы (магнитного кантилевера) на исследуемую магнитную структуру образца
- с возможностью обеспечить переход от предварительной визуализации большой области образца размерами десятки и сотни микрон с разрешением вплоть до оптического дифракционного предела к исследованию субмикронных областей с субдифракционной разрешающей способностью вплоть до 100 нм,
- допускающий реализацию в одной установке.

2. На основе термомагнитной печати с применением высококоэрцитивных эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок с низкой температурой Кюри разработан метод определения с высоким пространственным разрешением доменной структуры непрозрачных образцов магнитооптическим методом в составе атомно-силовой микроскопии.

3. Исследованы перспективные феррит-гранатовые пленки. Для состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$ изучены и определены зависимости угла фарадеевского вращения и шероховатости от длительности термообработки и параметров рассогласования параметров решеток пленок и подложек. Для двухслойных структур на подложках гадолиний галлиевого граната и оксида кремния с составами слоев $\text{Bi}_{1,0}\text{Lu}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$; $\text{Bi}_{2,5}\text{Gd}_{0,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Al}_{1,2}\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ изучены и определены зависимости параметров шероховатости, среднего размера зерен и фарадеевского вращения от способа кристаллизационного отжига.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались экспериментальные методы. Экспериментальные данные АСМ, МО и МСМ были получены с использованием сканирующих зондовых микроскопов Ntegra Prima, Ntegra Spectra. Образцы тонких пленок (пленок микронной и субмикронной толщины) были синтезированы с использованием методов жидкофазной эпитаксии, реактивного ионно-лучевого распыления и кристаллизационного отжига. Магнитооптический эффект Фарадея и его полевые зависимости (петли гистерезиса) были измерены компенсационным методом с использованием автоматического магнитополяриметра на длине волны 655 нм.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанный комплекс методов позволяет системно исследовать ферритмагнитные тонкопленочные образцы начиная с крупномасштабного обзора (с целью определения состояния поверхности образца, обнаружения доменной структуры, выявления ее типа) и заканчивая измерениями в нанометровом диапазоне в том числе с субдифракционным разрешением. При этом использование немагнитного кантилевера исключает риск перемагничивания образца. Все методы могут быть реализованы в одной установке.

2. Разработанный на основе термомагнитной печати реплик метод позволяет определять доменную структуру непрозрачных образцов магнитооптическим методом в составе атомно-силовой микроскопии с высоким пространственным разрешением.

3. Выявленные закономерности формирования феррит-гранатовых пленок состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$, зависимости функциональных параметров однослойных и двухслойных феррит-гранатовых структур состава $\text{Bi}_{1,0}\text{Lu}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{2,5}\text{Gd}_{0,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Al}_{1,2}\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на подложках плавленого кварца и гадолиний-галлиевого граната от параметров технологического процесса, могут быть использованы для оптимизации параметров пленок при создании многослойных фотонных кристаллов и магнитооптических устройств, таких как магнитооптические модуляторы, оптические изоляторы, магнитные полевые датчики.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертации внедрены в учебный процесс МИЭТ на кафедре «Интегральная электроника и микросистемы», используются при чтении курса лекций «Технологические процессы нанoeлектроники» и в соответствующем лабораторном практикуме для магистрантов 1-го курса.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный метод, основанный на использовании немагнитного апертурного кантилевера в атомно-силовой микроскопии в комбинации с магнитооптической микроскопией, позволяет исследовать магнитную доменную структуру тонких ферромагнитных пленок с высоким пространственным разрешением и без воздействия кантилевера на магнитную структуру образца, получая одновременно изображение доменной структуры и топографии образца с высоким пространственным разрешением.
2. С использованием апертурных кантилеверов, изготовленных ионно-ассистированным осаждением, магнитооптический метод в составе атомно-силовой микроскопии позволяет превзойти дифракционный предел классической оптической микроскопии и довести латеральную разрешающую способность до 100 и менее нанометров.
3. Разработанный метод создания магнитных реплик непрозрачных образцов с помощью высококоэрцитивных эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок с низкой температурой Кюри, позволяет исследовать магнитную структуру непрозрачных образцов магнитооптическим методом в составе атомно-силовой микроскопии в проходящем свете.
4. Оптимальное время кристаллизационного отжига для феррит-гранатовых тонких пленок состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$ на подложках гадолиний-галлиевого граната и пленок кальций-магний-цирконий-гадолиний-галлиевого граната составляет 15 ± 5 минут: при этом обеспечивается сочетание высокого значения угла фарадеевского вращения и низкой шероховатости поверхности пленок.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертации, представленные в работе, получены автором лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии. Во всех совместных работах автор участвовал в постановке задач, разработке методик исследования, проведении экспериментов, анализе результатов, написании статей, а также представлял

результаты исследований на научно-технических конференциях. Часть экспериментальных данных была получена совместно с к.ф.-м.н. Шелаевым А.В. и к.ф.-м.н. Михайловой Т.В.; часть образцов для исследований и интерпретация результатов выполнены совместно с к.ф.-м.н. Михайловой Т.В., д.ф.-м.н., профессором Бержанским В.Н., к.ф.-м.н. Шапошниковым А.Н.; изготовление и применение апертурных кантилеверов полученных ионно-ассистированным осаждением для целей магнитооптики высокого разрешения выполнены совместно с к.т.н. Коломийцевым А.С.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: XXII международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2015», Москва, 2015; III всероссийской научной молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», Уфа, 2015; 22-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2015», Москва, Зеленоград, 2015г; XX Международной конференции по постоянным магнитам (МКПМ-2015), Суздаль, 2015; 6-й Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, Москва, 2015; VII Байкальской международной конференции «Магнитные Материалы. Новые технологии», Иркутск, 2016; XVI Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Алушта, 2016; Сканирующая Зондовая Микроскопия, Екатеринбург, 2017; Международная конференция по постоянным магнитам, Суздаль, 2017; XIII Международная конференция. Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии, Минск, 2018; 4ая Международная конференция по метаматериалам и нанофотонике «METANANO», Санкт-Петербург -2019; 41th Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Рим-2019; XXII-я Международная конференция по постоянным магнитам, Суздаль-2019; XXIV симпозиум «Нанозифика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2020; Конференция-семинар “Методы и средства научных исследований, MMSR-2020”, Москва-2020; Российский форум «Микроэлектроника 2021», Алушта 2021; IVCМ-21, Калининград 2021г; ICFM, Симферополь 2021; SPBOpen, Санкт-Петербург 2021; «Информационные технологии и технические средства управления», Астрахань 2021г; ОМИП, Москва 2021г.

Публикации

По материалам диссертации опубликована 31 работа, включая 17 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, цитируемых в Web of Science или Scopus, а также 14 - в сборниках трудов, материалах и тезисах докладов международных и российских научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 112 наименований. Основное содержание диссертации изложено на 114 страницах и содержит 72 рисунка и 5 таблиц

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены различные типы магнитной доменной структуры, условия ее существования и формирования, типы доменных границ. Рассмотрены особенности формирования магнитной доменной структуры в ферримагнетиках. Рассмотрены области применения ферримагнитных тонких пленок и методы их создания на примере пленок ферритов-гранатов. Показаны достоинства и недостатки различных технологических методов синтеза тонких пленок ферримагнетиков и многослойных структур на их основе, рассмотрена критическая важность параметров термообработки (кристаллизационного отжига) как одного из ключевых технологических этапов создания пленок ферритов-гранатов. Показана необходимость дальнейшего изучения влияния параметров термообработки для перспективных составов магнитооптических тонких пленок ферримагнетиков. В первой главе, так же представлены сведения о существующих способах исследования магнитной доменной структуры образцов, их достоинствах и недостатках. В том числе, показаны возможности магнитооптических методов изучения доменной структуры, принципы функционирования и ограничения метода, связанные в первую очередь с низкой разрешающей способностью из-за оптического дифракционного предела. Также показано, что одним из наиболее востребованных методов для изучения магнитной доменной структуры является магнитно-силовая микроскопия (МСМ), при использовании которой, на результаты эксперимента могут оказывать влияния множество параметров, таких как: параметры сканирования, состав магнитного покрытия кантилевера, направления намагниченности кантилевера, жесткость кантилевера, наличие электростатического заряда на поверхности образца, что может привести к слабому МСМ контрасту, а в худшем случае к невозможности получения МСМ изображения и перемагничиванию изучаемого образца. Показано, что необходимо совершенствование методической и приборной базы для исключения недостатков существующих методов и возможности исследования магнитной доменной структуры тонкопленочных образцов с высоким пространственным разрешением с минимизацией влияния факторов, оказывающих негативное влияние на получаемые результаты.

Вторая глава посвящена исследованию влияния технологических параметров синтеза ферримагнитных тонких пленок и многослойных структур на их основе на функциональные и морфологические параметры пленок. Рассмотрено влияние параметров кристаллизационного отжига пленок ферритов-гранатов на функциональные и морфологические параметры пленок состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$, а также двухслойных структур на подложках гадолиний галлиевого граната и подложках оксида кремния с составами слоев $\text{Bi}_{1,0}\text{Lu}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$; $\text{Bi}_{2,5}\text{Gd}_{0,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Al}_{1,2}\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ полученных методом реактивного ионно-лучевого распыления.

Пленки ферритов-гранатов состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$ (BiGa: DyIG) и толщиной 120 нм синтезированы методом реактивного ионно-лучевого распыления на подложках гадолиний-галлиевого граната (GGG) и кальций-магний-цирконий-гадолиний-галлиевого граната (CMZGGG). Предварительно пленки осаждали на горячие (350 °C) подложки GGG и кальций-магний-цирконий-гадолиний-галлиевого граната CMZGGG кристаллографической ориентации (111) методом реактивного-ионно-лучевого распыления в смеси аргон-кислород в соотношении 70 и 30 %, соответственно. Затем пленки проходили кристаллизационный отжиг в течении от минуты до нескольких часов при температуре 700 °C для формирования гранатовой фазы в исходно аморфной пленке (параметры и особенности этого процесса были описаны ранее в работах [20,21]).

Изучена доменная структура пленок, шероховатость (RMS), исследованы зависимости угла фарадеевского вращения пленок от длительности термообработки и параметров рассогласования решеток пленок и подложек.

Показано, что шероховатость (RMS) пленок на подложках GGG и CMZGGG возрастает с увеличением времени отжига t , их поверхностная текстура изменяется от мелкозернистой до крупнозернистой. При времени отжига до 60 мин RMS пленок на подложках CMZGGG существенно ниже, чем на GGG. На рисунке 1 представлены зависимости угла фарадеевского вращения и RMS от времени кристаллизационного отжига для пленок на подложках GGG.

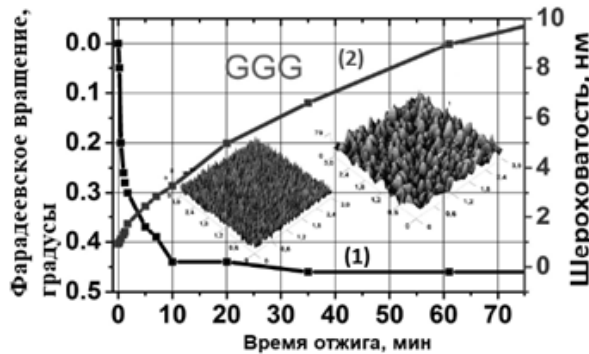


Рис. 1. Зависимости угла фарадеевского вращения (1) и RMS (2) от длительности кристаллизационного отжига феррит-гранатовых пленок на подложках GGG.

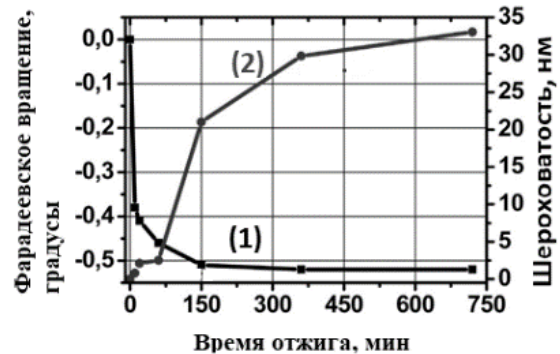


Рис. 2. Зависимости угла фарадеевского вращения (1) и RMS (2) от длительности кристаллизационного отжига феррит-гранатовых пленок на подложках CMZGGG.

Показано, что после 10 минут отжига значение угла фарадеевского вращения достигает насыщения, при этом RMS составляет 3,3 нм. После 60 минут отжига значение угла фарадеевского вращения уже увеличивается незначительно, в то время как RMS вырастает до 10 нм и более. Структура поверхности пленок изменяется – при отжиге формируются уже более крупные зерна.

На рисунке 2 представлены зависимости угла фарадеевского вращения и RMS от времени кристаллизационного отжига пленок на подложках CMZGGG. Показано, что после 60 минут отжига угол фарадеевского вращения еще не достигает насыщения, а RMS составляет 2,5 нм. Структура поверхности мелкозернистая. Зависимость угла фарадеевского вращения для данной серии образцов достигает насыщения только при $t = 360$ мин. При этом RMS составляет 32,6 нм, а средний размер кристаллитов при их основании – 250-300 нм. То есть пленки при такой длительности отжига уже демонстрируют развитую крупноблочную структуру поверхности. Таким образом, увеличение времени отжига приводит к увеличению размера кристаллитов за счет их слияния, форма кристаллитов остается неизменной.

Рассогласование параметров кристаллических решеток пленки и подложки после отжига длительностью более 5 мин не зависит от дальнейшего увеличения времени отжига и составляет 0,0168 нм и 0,0073 нм для пленок, кристаллизованных на подложках GGG и CMZGGG, соответственно. Таким образом, составляющая напряжений в пленках на подложках GGG выше, что объясняет повышенную RMS пленок на подложках GGG по сравнению с пленками на CMZGGG при одинаковых t . Оптимальное время кристаллизационного отжига для пленок на обоих типах подложек

составляет 15 ± 5 минут: при этом обеспечивается сочетание высокого значения угла фарадеевского вращения и низкой шероховатости поверхности пленок.

Магнитные доменные структуры в отсутствие внешних магнитных полей тонких пленок на подложках GGG и CMZGGG с различным временем отжига, показаны на рисунке 3. Доменные структуры наблюдались с использованием двухпроходного режима МСМ.

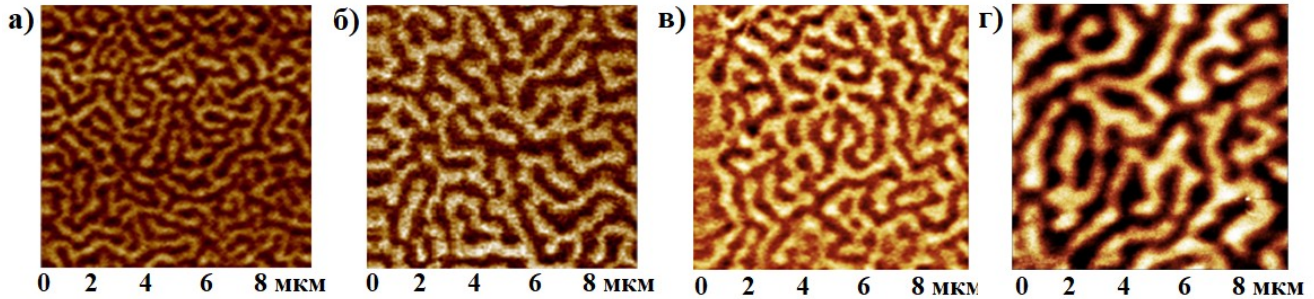


Рис. 3. Доменная структура феррит-гранатовых пленок, длительность кристаллизационного отжига 72 сек GGG (а), 5 мин GGG (б), 20 мин GGG (в), 20 мин CMZGGG (г).

Показано, что увеличение времени отжига приводит к увеличению средней ширины доменов W ($W = 0,5$ мкм при $t = 72$ сек и $W = 1$ мкм при $t = 20$ мин). Для пленок на подложках CMZGGG $W = 0,7$ мкм при $t = 20$ мин, что может указывать на различные значения одноосной магнитной анизотропии пленок на подложках GGG и CMZGGG. Действительно, измерения поля одноосной анизотропии показали, что при том же времени отжига поле одноосной анизотропии пленок на GGG выше, чем пленки на CMZGGG. Таким образом, увеличенная ширина доменной структуры пленок на подложках CMZGGG является закономерной.

Изучено влияние режима кристаллизационного отжига на формирование двухслойных кристаллических структур на основе висмут-замещенных пленок ферритов-гранатов с высокой концентрацией висмута на различных подложках (GGG и SiO_2). Процессы кристаллизации протекают по-разному на подложках, имеющих структуру граната и без нее [20,22]. Двухслойные структуры сформированы из слоев составов: G1 – $\text{Bi}_{1,0}\text{Lu}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$, G8 – $\text{Bi}_{2,5}\text{Gd}_{0,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Al}_{1,2}\text{O}_{12}$ и GN – $\text{Bi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Суммарная толщина слоев в структурах соответственно составам составила 310 нм, 275 нм и 257 нм. Сравнивались два метода отжига: 1) метод «погружения», именуемый в дальнейшем "I", при котором образец почти сразу же погружали в тепловое поле при температуре отжига и последующей длительностью термообработки в течении 20 мин; 2) метод «медленного» отжига, именуемый в дальнейшем "II", при котором отжиг проводился при очень медленном нагреве (скорость нагрева около $2\text{-}3^\circ\text{C}/\text{мин}$) образца до оптимальной температуры и последующей кристаллизации при постоянной температуре в течение 60 мин. Для исследований мы использовали АСМ-измерения площади поверхности пленок 15×15 мкм и 2×2 мкм. Были определены параметры перепада высот P , шероховатости RMS, и среднего размера поликристаллитов AGS. Угол фарадеевского вращения и магнитооптические петли гистерезиса FHL были измерены компенсационным методом с использованием автоматического магнитополяриметра на длине волны 655 нм.

На рисунке 4 показана структура поверхности таких пленок на подложке GGG при различных методах отжига. Сравнение топографии и гистограммы распределения зерен по размерам в зависимости от состава двухслойной пленки при отжиге II показано на рисунке 5. Изменяя состав второго слоя (меняя тип анизотропии), мы

можем варьировать магнитные характеристики системы. Пленки G1/G1 имеют максимальный коэффициент прямоугольности $K_s = 0,99$ и низкое поле насыщения $H_s = 0,59-1,10$ кЭ (рисунок 6.). Это подтверждает наличие анизотропии типа «легкая ось». Анизотропии «угловой фазы» и «легкой плоскости» реализованы в пленках G1/G8 ($K_s = 0,66$, $H_s = 0,75-1,34$ кЭ) и G1/GN ($K_s = 0,27$, $H_s = 0,74-1,60$ кЭ).

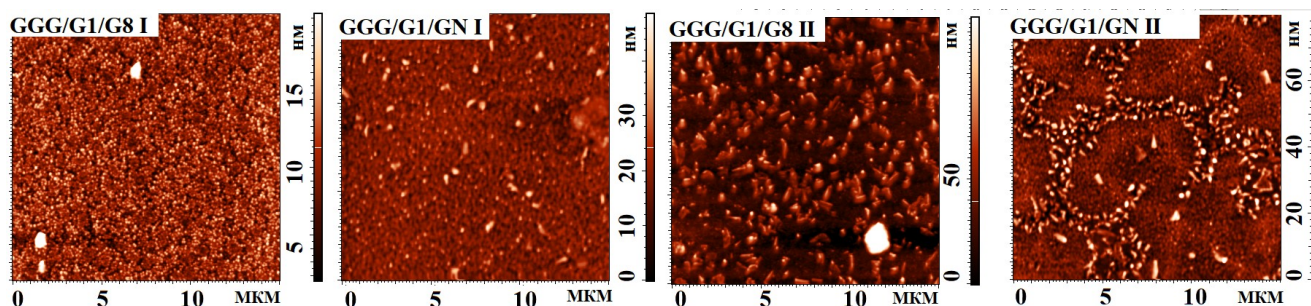


Рис. 4. Топография феррит-гранатовых структур различного состава на подложке GGG. Сравнение пленок, отожженных первым I и вторым II режимами.

Наиболее неравномерная структура наблюдается на образцах подложек SiO_2 при режиме отжига I. Зерна имеют наибольшие различия в размерах. Пленки, образующиеся при режиме отжига II, имеют более однородную структуру на SiO_2 . Более длительное время отжига (режим II) приводит к переформированию центров кристаллизации в крупные гладкие поликристаллические пленки. Напротив, на GGG подложках увеличение времени отжига приводит к образованию крупных кристаллитов и неоднородности их распределения. Рисунок 5 показывает зависимость параметров топографии от метода кристаллизации для образцов на подложке GGG.

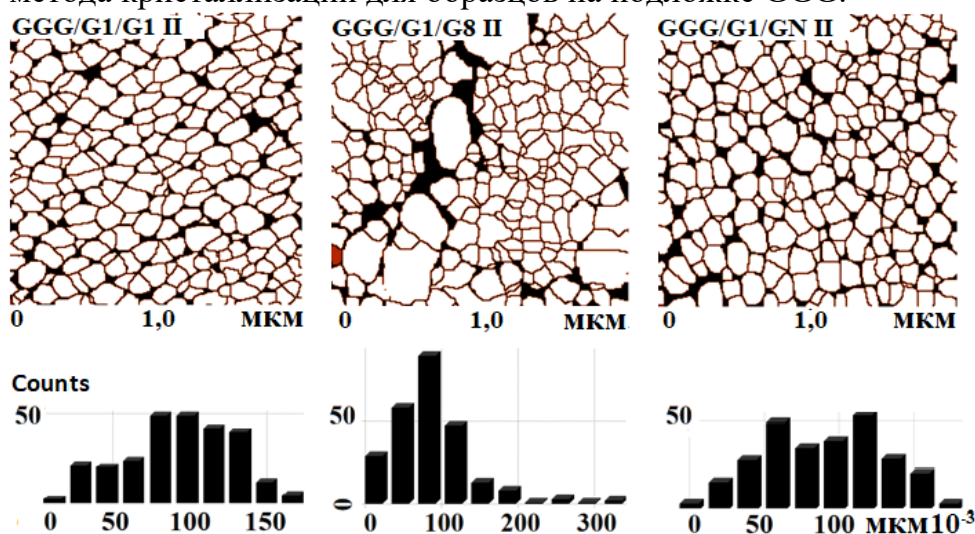


Рис. 5. Анализ зерен различных двухслойных феррит-гранатовых структур на подложке GGG. Пленки были отожжены в режиме II.

На рисунке 6 показана корреляция топографии и FHL трех типов образцов на подложках GGG и SiO_2 . Все образцы, независимо от их состава, после кристаллизации имеют поликристаллическую поверхность. Согласно данным АСМ, в обоих случаях (на подложках GGG и SiO_2) пленкообразование происходит по островковому механизму.

В случае подложки SiO_2 образование поликристаллов начинается самопроизвольно в некоторых местах на поверхности подложки, а образование пленки происходит путем объединения агрегатов зерен микронных размеров. Это также видно по увеличению полей насыщения образцов на подложках GGG и SiO_2 (рисунок 6).

Зерна на подложках SiO_2 имеют большой разброс анизотропии. Поверхность пленок на GGG характеризуется равномерным распределением кристаллитов. Зерна имеют примерно одинаковый размер даже на сканах большой площади. Средний размер кристаллитов составляет около 90-100 нм.

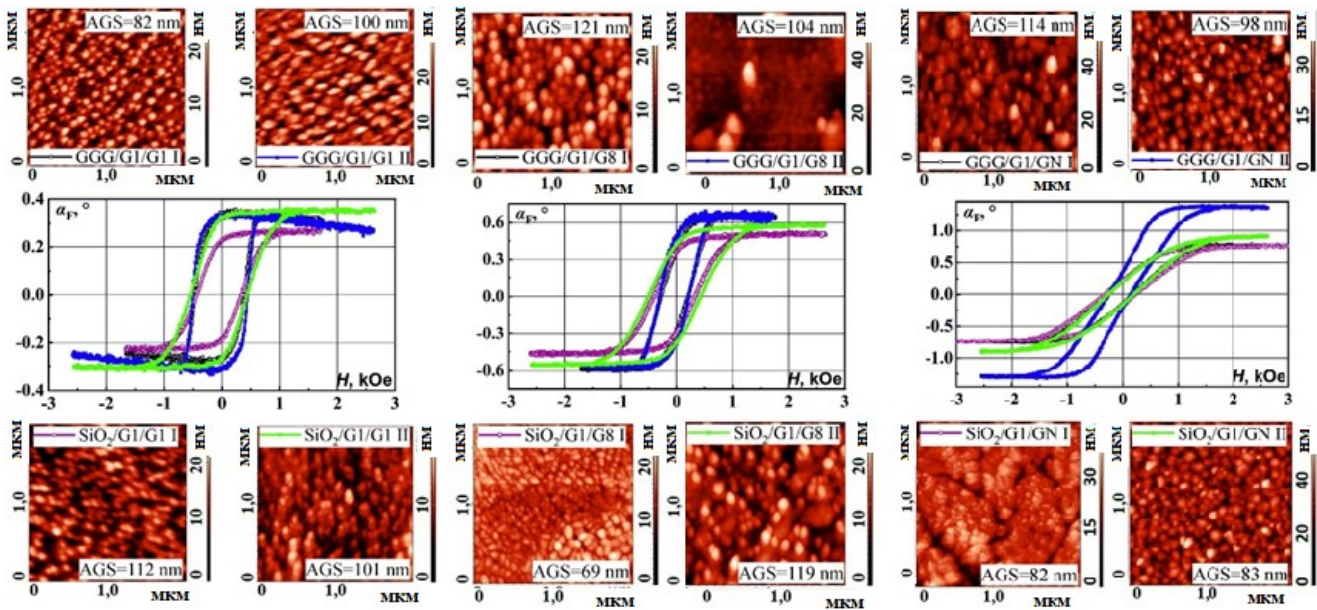


Рис. 6. Топография и FHL двухслойных феррит-гранатовых структур на подложках SiO_2 и GGG: со слоями состава G1/G1 (слева), G1/G8 (в центре), G1/GN (справа).

Оба метода подходят для кристаллизации плёнок висмут-замещенных ферритов-гранатов состава G1/G1 и G1/G8 на подложках GGG. Однако метод II (метод «медленного» отжига) лучше подходит для формирования всех исследованных пленок ферритов-гранатов на подложках из SiO_2 , которая не обладает структурой граната, и для формирования структуры G1/GN независимо от типа подложки. Таким образом, было обнаружено, что более гладкие и однородные образцы на негранатовых подложках могут быть получены при использовании медленного и длительного отжига, в то время как высококачественные пленки на гранатовых подложках формируются при более коротком нагреве и отжиге.

4. **Третья глава** посвящена разработке и апробированию комплекса методов, объединяющих технологии магнитооптической микроскопии и атомно-силовой микроскопии и позволяющих: одновременно исследовать топографию и магнитную доменную структуру прозрачных пленок ферромагнетиков без риска обратного влияния измерительной системы (магнитного кантилевера) на исследуемую магнитную структуру образца, с возможностью обеспечить переход от предварительной визуализации большой области образца размерами десятки и сотни микрон с разрешением вплоть до оптического дифракционного предела к исследованию субмикронных областей с субдифракционной разрешающей способностью. В том числе разработан метод определения с высоким пространственным разрешением доменной структуры непрозрачных образцов на основе термомагнитной печати с применением высококоэрцитивных эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок с низкой температурой Кюри.

Представлен способ комбинации магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии. Предложена схема измерения, включающая следующие

основные узлы: коротковолновой лазер (473нм), поляризатор, схему сбора и подвода лазерного излучения к поверхности ферромагнитной тонкой пленки, находящейся на пьезокерамическом сканере атомно-силового микроскопа, специальную оптическую измерительную АСМ головку, включающую объектив 100x NA=0,7 для фокусировки лазерного излучения на образец, полый держатель образца, линзу для сбора прошедшего через образец оптического сигнала, анализатор, детектор. Схематично измерительная установка представлена на рисунке 7.

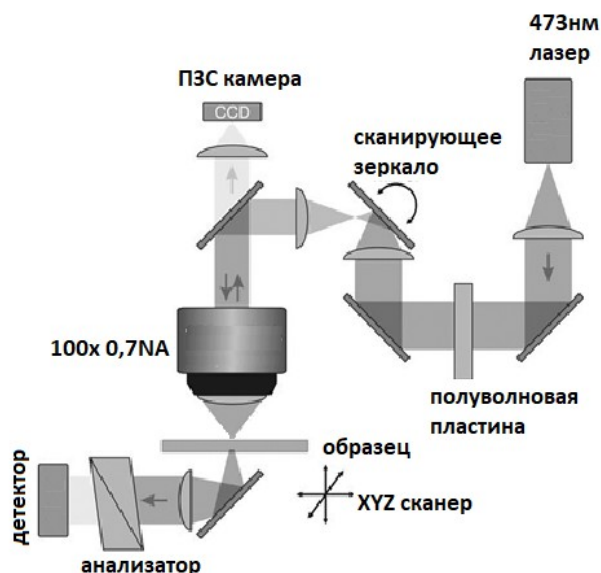


Рис. 7. Схематическое изображение измерительной установки в комбинации магнитооптического метода и МСМ

Данная система позволяет, используя коротковолновой лазер, провести магнитооптические измерения в той же системе, на той же самой области образца, которая затем может быть исследована АСМ методами. В данной конфигурации измерительной системы не требуется переустановка системы, репозиционирование измерительной головки или образца, что гарантирует при наличии оптического контроля попадание в единую область сканирования как лучом лазера, так и МСМ кантилевером.

Показана возможность измерений доменной структуры одной и той же области образца магнитооптическим методом, а также доменной структуры и топографии классическим МСМ методом рисунок 8 (а - г). Показано, что доменные структуры, полученные магнитооптическим методом и МСМ соответствуют друг другу, однако в результате сканирования образца в режиме двухпроходного МСМ, магнитный кантилевер при взаимодействии с образцом перемагнитил некоторые участки исходной доменной структуры (выделенная область на рисунке 8 (а, в, г)), факт возможного перемагничивания является недостатком МСМ метода.

Ограничением магнитооптических методов изучения доменной структуры является дифракционный предел оптических методов. На практике удается достичь оптического разрешения 0,5мкм - 0,8мкм. Эти значения предельного разрешения слишком велики для исследования наноразмерных объектов и их внутренней структуры.

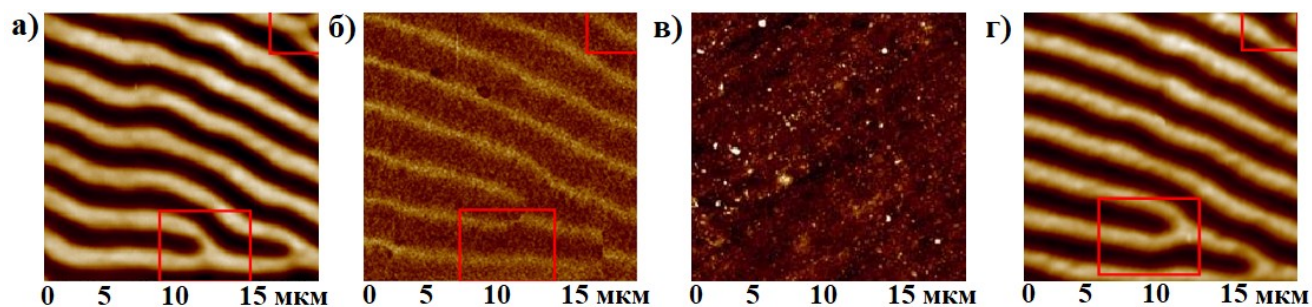


Рис. 8. Доменная структура: МО метод (а), доменная структура двухпроходным МСМ (б), топография этой же области (в), МО метод (г).

Таким образом, возникает необходимость в разработке методов, позволяющих преодолеть дифракционный предел магнитооптической микроскопии с одной стороны и риск перемагничивания образца магнитным кантилевером с другой стороны. Предложена возможность использования апертурного кантилевера для повышения разрешающей способности магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии. Схема засветки образца для реализации магнитооптического метода в составе АСМ с использованием апертурных кантилеверов представлена на рисунке 9.

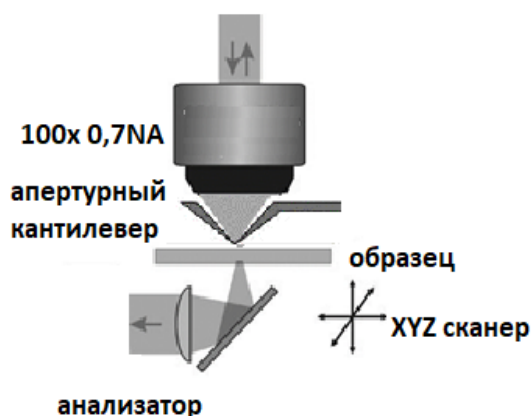


Рис. 9. Схема засветки образца при реализации магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии с использованием апертурного кантилевера.

Основным отличием от классического магнитооптического метода является использование немагнитного апертурного кремниевого кантилевера для засветки образца в ближнепольном режиме. Показано, что засветка образца в ближне-польном режиме на расстоянии около 10 нм между зондом и поверхностью тонкой пленки позволяет существенно улучшить разрешение и контраст магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии. На рисунке 10 показано сравнение двух режимов работы магнитооптического метода. Видно, что при засветке образца через апертурный кантилевер качество магнитооптического изображения доменной структуры тонкой пленки значительно повышается.

На практике показана возможность одновременного исследования топографии и доменной структуры образцов тонких пленок магнитооптическим методом в составе АСМ с помощью немагнитного апертурного кантилевера. Топография феррит-гранатовой тонкой пленки, полученная одновременно с магнитооптическим контрастом с одной и той же области образца 7×7 мкм одновременно показаны на рисунке 11 (а, б).

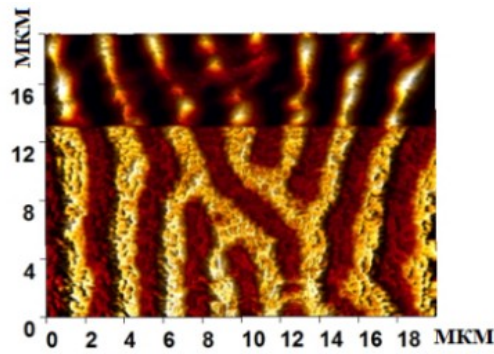


Рис. 10. Классический магнитооптический контраст (сверху) и магнитооптический контраст с использованием апертурного кантилевера в составе атомно-силовой микроскопии (снизу).

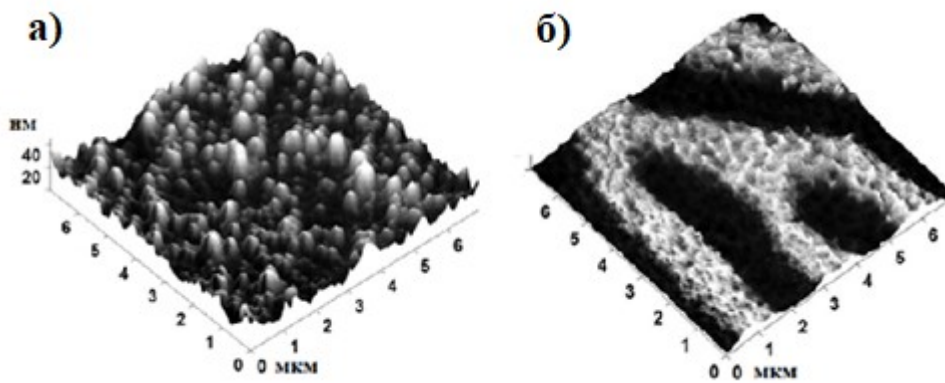


Рис. 11. Топография феррит-гранатовой тонкой пленки (а) полученная одновременно с магнитооптическим контрастом (б) с одной и той же области образца 7×7 мкм единовременно.

Использование немагнитного апертурного кантилевера для магнитооптики высокого разрешения позволяет решить одновременно несколько важных задач:

1. Исключает возможность перемагничиваний в системе зонд-образец.
2. Повышает разрешающую возможность магнитооптического метода, позволяя получать изображения магнитной доменной структуры образца с разрешением выше дифракционного предела.
3. Позволяет одновременно получать информацию о доменной структуре образца магнитооптическим методом и информацию о топографии с помощью контактного или полуконтактного режима АСМ.
4. Позволяет получать магнитный контраст в АСМ используя единичный проход при сканировании образца.
5. Позволяет исключить влияние внешних магнитных полей на кантилевер при сканировании.

Показана возможность получения магнитной доменной структуры непрозрачных образцов магнитооптическим методом в составе атомно-силовой микроскопии с применением высококоэрцитивных эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок с низкой температурой Кюри для термомагнитной печати. Пленки с низкой температурой Кюри были синтезированы методом жидкофазной эпитаксии на кристаллической

подложке GGG с кристаллографической ориентацией (111). Увеличение коэрцитивности пленки достигнуто увеличением параметра рассогласования между кристаллическими решетками пленки и подложки, включением Sm в состав пленки. Уменьшение температуры Кюри достигнуто добавлением Al, Ga и Sc [21]. Для исследований была выбрана пленка с температурой Кюри 70°C, коэрцитивностью 62 Э, полем насыщения 280 Э и рассогласованием постоянных решетки пленки-подложки 0,087Å, RMS поверхности 5 нм.

Показана возможность создания магнитной реплики непрозрачного образца (магнитной дискеты) на пленку феррита-граната. В результате, доменная структура феррит-гранатовой пленки повторила доменную структуру флоппи-диска, как это продемонстрировано на рисунке 12 (а, б).

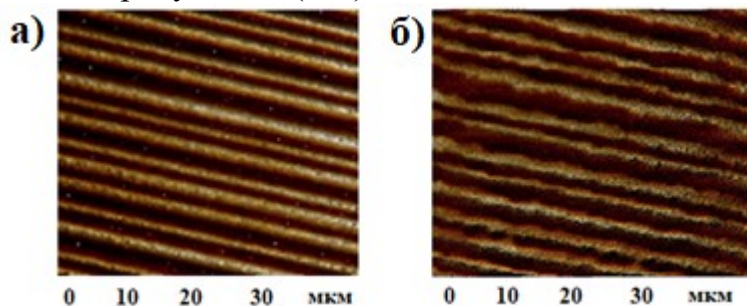


Рис. 12. Изображения доменной структуры дискеты (а) и пленки феррита-граната с записанной доменной структурой дискеты (б).

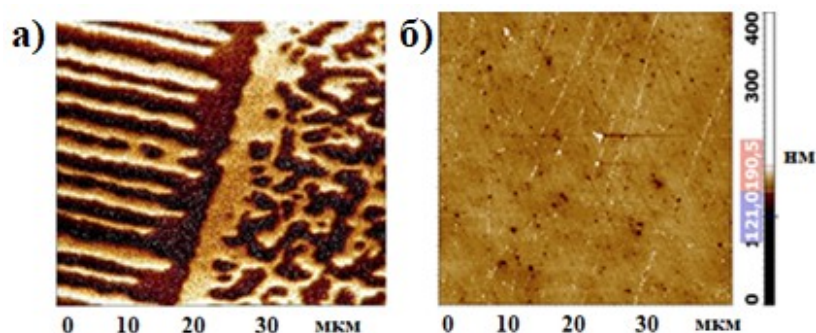


Рис. 13. Изображение границы между двумя типами доменной структуры в пленке феррита-граната (записанная область слева и собственная область пленки справа) (а) и АСМ изображение той же самой области (б).

Выявлено, что записанная доменная структура имеет несколько размытые границы доменов. Данное обстоятельство связано с наличием дислокационной сети, сформированной в процессе роста феррит-гранатовых пленок (из-за рассогласования констант решеток пленки-подложки). Из полученных результатов было определено отклонение формы регистрируемых границ доменной структуры в феррит-гранатовой пленке от оригинальной доменной структуры флоппи-диска, оно составило $\pm 0,4$ мкм. Поскольку дискета в некоторых областях не имела доменной структуры (отсутствовала запись), то после термомагнитного копирования в данных областях феррит-гранатовая пленка проявляла свою собственную доменную структуру со средним периодом 6,4 мкм. Граница между двумя типами доменной структуры пленки показана на рисунке 13.

В четвертой главе проведено исследование апертурных кантилеверов, изготовленных ионно-ассистированным осаждением, и их применение для

магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии в целях довести латеральную разрешающую способность до 100 и менее нанометров.

Кантилеверы, острие которых представляет собой полый конус с отверстием от 50 до 200 нм были исследованы в качестве апертурных зондов для метода магнитооптической микроскопии в составе атомно-силовой микроскопии для изучения доменной структуры и топографии ферромагнетиков. Зонды были изготовлены на основе чипов стандартных кантилеверов NSG-11 (TipsNano). Для формирования острия использовались методы локального ионно-лучевого травления и локального ионно-стимулированного осаждения на основе электронно-ионного микроскопа Nova NanoLab 600. Было проведено исследование оптических свойств предлагаемых апертурных кантилеверов, в том числе: проверка пропускания света через апертуру различных диаметров, проверка возможности установки точки сбора света внутри проходящего светового пятна, оценка коэффициента светопропускания, измерены поляризационные характеристики падающего света без кантилевера и света, проходящего через кантилевер, для исследования возможности работы во всем диапазоне углов поляризации возбуждающего света использовалась схема вращающимся поляризатором и неподвижным анализатором.

Показана необходимость учета внутреннего вращения поляризации кантилевера при выборе положения анализатора. Показано, что с увеличением апертуры кантилевера уменьшается разность угла поворота исходного луча и прошедшего через апертуру кантилевера. На рисунке 14 показаны измерения зависимостей вращения плоскости поляризации света, прошедшего через апертуру кантилевера относительно поляризации исходного луча.

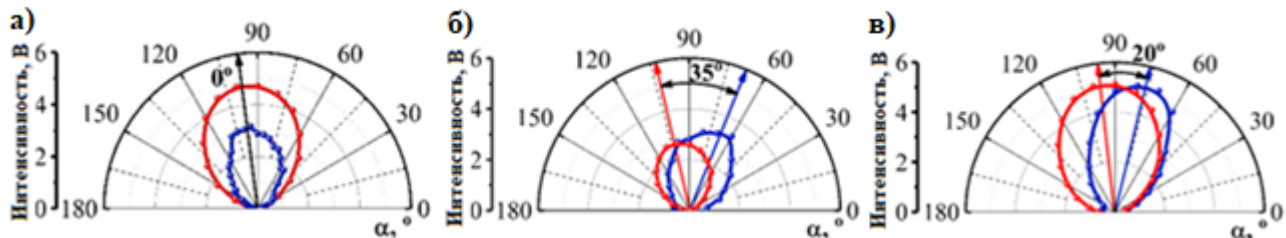


Рис. 14. Вращение поляризации в апертурных кантилеверах с размерами апертуры 264 нм (а), 83 нм (б) и 90 нм (в). Красным цветом показано положение поляризации исходного лазерного луча. Синим цветом показана поляризация света, прошедшего через апертуру кантилевера.

Показано увеличение коэффициента пропускания апертурных кантилеверов, изготовленных ионно-ассистированным осаждением углеродного конуса относительно коэффициента пропускания альтернативных апертурных кантилеверов на основе конуса металлизированного оксида кремния. Коэффициент пропускания экспериментальных образцов кантилеверов с углеродным острием превышает контрольные значения в несколько раз. Для изучения возможности использования апертурных кантилеверов с углеродным острием для исследования топографии проведены измерения тестовых решеток. Измерения показали хорошую корреляцию между паспортными параметрами решеток (высота и период конструкции) и измеряемыми. Измеренный период TGQ1 составляет 3,07 мкм, а высота структур – 23,1 нм. Измеренный период TGZ3 составляет 3,02 мкм, а высота полосы – 496 нм. Это означает, что апертурные кантилеверы могут быть использованы для получения топографических изображений с очень высокой

точностью по оси Z не смотря на кольцеобразную структуру и угол схождения конуса. Показаны возможности и ограничения использования экспериментальных кантилеверов для исследования объектов с высоким аспектным соотношением.

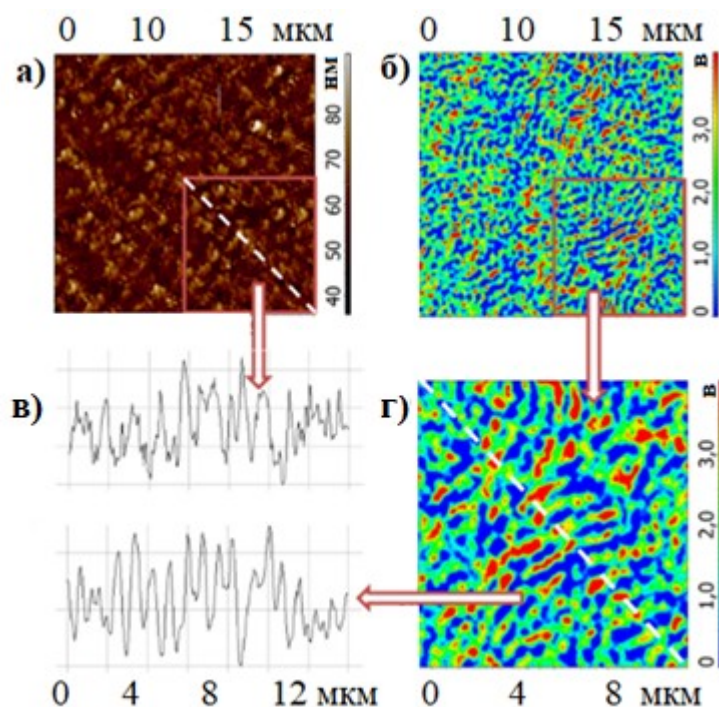


Рис. 15. Топография (а) и доменная структура (б) тонкой пленки феррит-граната, полученные одновременно методом ближнепольной поляризационной микроскопии, увеличенное изображение ДС (г) и сравнение профилей топографии и ДС (в).

Для апробации апертурных кантилеверов, созданных для магнитооптического метода в составе МСМ, были синтезированы ферромагнитные феррит-гранатовые пленки с различным периодом доменной структуры: эпитаксиальные пленки с периодом доменной структуры 4 мкм, 6 мкм, 9 мкм; напыленные пленки с периодом доменной структуры 300 нм и 800 нм. При этом напыленные пленки использовались для демонстрации высокой разрешающей способности метода (рисунок 15). Получены данные о характеристиках поверхности и доменной структуре пленок ферритов-гранатов, продемонстрирована возможность получения изображения высокого разрешения (100 нм) магнитной доменной структуры ферромагнетиков с помощью магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии.

Основные результаты и выводы:

Общим результатом диссертационной работы является разработка и апробация комплекса методов, объединяющих технологии магнитооптической микроскопии и атомно-силовой микроскопии и позволяющих одновременно исследовать топографию и магнитную доменную структуру прозрачных пленок ферромагнетиков без риска обратного влияния измерительной системы (магнитного кантилевера) на исследуемую магнитную структуру образца и с возможностью обеспечить переход от предварительной визуализации большой области образца размерами десятки и сотни микрон с разрешением вплоть до оптического дифракционного предела к исследованию субмикронных областей с субдифракционной разрешающей способностью вплоть до 100 нм.

В процессе работы получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод, основанный на использовании немагнитного апертурного кантилевера в составе атомно-силовой микроскопии и ее комбинации с магнитооптической микроскопией, который позволяет исследовать магнитную доменную структуру тонких пленок с высоким пространственным разрешением и без воздействия кантилевера на магнитную структуру образца, получая одновременно изображение доменной структуры и топографии образца с высоким пространственным разрешением.

2. Разрешающая способность магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии, повышена до 100 нм, что превосходит дифракционный предел классической оптической микроскопии, путем использования изготовленных ионноассистированным осаждением апертурных кантилеверов.

3. Разработан метод создания магнитных реплик непрозрачных образцов с помощью высококоэрцитивных эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок с низкой температурой Кюри, который позволяет исследовать магнитную структуру непрозрачных образцов оптическими методами в проходящем свете.

4. Показана возможность использования изготовленных ионно-ассистированным осаждением апертурных кантилеверов для исследования морфологии образцов с высоким пространственным разрешением.

5. Апробирован магнитооптический метод в составе атомно-силовой микроскопии с использованием изготовленных ионно-ассистированным осаждением кантилеверов сверхмалой до порядка 100 нм апертуры для получения магнитооптического контраста высокого пространственного разрешения.

6. Исследована возможность комбинации магнитооптического метода и магнитно-силовой микроскопии для изучения доменной структуры тонких пленок. Показана возможность исследования прозрачных тонкопленочных образцов магнитооптическим методом в составе атомно-силового микроскопа без использования кантилевера для предварительной визуализации доменной структуры.

7. Исследованы зависимости функциональных и морфологических параметров пленок ферритов-гранатов состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$, осажденных методом реактивного ионно-лучевого распыления от времени кристаллизационного отжига. Показана динамика изменений морфологии и магнитооптических характеристик пленок в зависимости от времени кристаллизационного отжига. Впервые определена оптимальная длительность отжига для достижения сочетания магнитооптических характеристик, с одной стороны, и параметров шероховатости поверхности пленок, с другой стороны.

8. Исследованы перспективные феррит-гранатовые пленки. Для состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$ изучены и определены зависимости угла фарадеевского вращения и шероховатости от длительности термообработки и рассогласования параметров решеток пленок и подложек.

9. Для двухслойных структур на подложках гадолиний галлиевого граната и оксида кремния с составами слоев $\text{Bi}_{1,0}\text{Lu}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$; $\text{Bi}_{2,5}\text{Gd}_{0,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Al}_{1,2}\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ изучены и определены зависимости параметров шероховатости, среднего размера зерен и фарадеевского вращения от способа кристаллизационного отжига.

10. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс МИЭТ на кафедре «Интегральная электроника и микросистемы», используются при чтении курса лекций «Технологические процессы нанoeлектроники» и в соответствующем лабораторном практикуме для магистрантов 1-го курса.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Ю.Е. Высоких**, А.В. Шелаев, В.И. Шевяков, А.Р. Прокопов, А.Н. Белов, и С.Ю. Краснобородько. Исследование особенностей функционирования магнитооптического метода в составе магнитно- силовой микроскопии // Российские нанотехнологии. - 2016. - Т. 11. – Вып. 11–12. - С. 104–108.
Yu.E. Vysokikh, A.V. Shelaev, V.I. Shevyakov, A.R. Prokopov, A.N. Belov, и S.Y. Krasnoborod'ko. Study of functioning of the magneto-optical method as part of magnetic force microscopy // Nanotechnologies in Russia. – 2016. - Vol. 11. – P. 815–819 (Web of Science, Scopus).
2. **Yu.E. Vysokikh**, A.V. Shelaev, A.R. Prokopov, V.I. Shevyakov, и S.Y. Krasnoborodko. Magnetic domain structure investigation of Bi: YIG-thin films by combination of AFM and cantilever-based aperture SNOM // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. - Vol. 741. – No. 1. - P. 12190 (Scopus).
3. **Yu.E. Vysokikh**, V.I. Shevyakov, A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, и A.V. Shelaev. Integration of scanning near field polarization optical microscopy and atomic force microscopy for investigation of magnetic and ferroelectric materials // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). - 2017. - P. 1445–1448 (Web of Science, Scopus).
4. **Yu.E. Vysokikh**, A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, V.N. Berzhansky, A.V. Karavainikov, N.N. Gerasimenko, и D.I. Smirnov. Magneto-optical, Structural and Surface Properties of RIB Sputtered (Bi,Ga)- substituted DyIG films // Materials Research Bulletin. – 2017. - Vol. 95. - P. 115 - 122 (Web of Science, Scopus).
5. **Ю.Е. Высоких**, С.Ю. Краснобородько, В.И. Шевяков, В.Н. Бержанский, Т.В. Михайлова, А.Н. Шапошников, А.Р. Прокопов, А.С. Недвига, Магнитно-силовая микроскопия доменной структуры феррит-гранатовых пленок - носителей термомангнитной записи // Известия вузов. Электроника. - 2017. – Т.22. - №6. - С 596 - 601 (ВАК).
6. **Yu.E. Vysokikh**, S.Yu. Krasnoborodko, T.V. Mikhailova, A.N. Shaposhnikov, M.F. Bulatov, and D.V. Churikov. High Resolution Magneto-optical Microscopy of Bi:YIG-thin Films with Both Domains and Topography Characterization // Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). - 2019, - P. 1607-1611 (Scopus)
7. **Yu.E. Vysokikh**, S.Yu. Krasnoborodko, A.S. Kolomiytsev, A.A. Fedotov, A.N. Shaposhnikov, M.F. Bulatov, D.V. Churikov, V.I. Shevyakov. Advanced aperture cantilevers made by focused ion beam for both magnetic domain structure and morphology investigation in high resolution magneto optical microscopy// Journal of Physics: Conference Series. – 2019. - Vol. 1410. -No. 1. -P. 012187. (Scopus).
8. **Yu.E. Vysokikh**, S.Yu. Krasnoborodko, Y.V. Danishevskaya, T.V. Mikhailova, A.S. Nedviga, V.N. Berzhansky, M.F. Bulatov, D.V. Churikov. Magnetic-force microscopy of thin Bi:IG films for thermomagnetic recording// Journal of Physics: Conference Series. – 2019. - Vol. 1410. -No. 1. - P. 012224 (Scopus).
9. A.N. Shaposhnikov, S.D. Lyashko, A.S. Nedviga, A.V. Karavainikov, E.Yu. Semuk, **Yu.E. Vysokikh** and T.V. Mikhailova. Scanning probe microscopy investigation of iron garnet films for magnetoplasmonics// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 699. – P. 012043. (Scopus).
10. T.V. Mikhailova, **Yu.E. Vysokikh**, S.Yu. Krasnoborodko, A.S. Kolomiytsev and A.A. Fedotov. Light polarization and intensity behaviour in aperture cantilevers with carbon tip created by focused ion beam// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 699. – P. 012030 (Scopus).

11. S.Yu. Krasnoborodko, **Yu.E. Vysokikh**, S.A. Smagulova, M.F. Bulatov, D.V. Churikov, and V.I. Shevyakov. Defocused Ion Beam Etching of the Silicon Probes for High Resolution Atomic-force Microscopy// Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). – 2019. P. 1063-1066. (Scopus).
12. S.Yu. Krasnoborodko, **Yu.E. Vysokikh**, M.F. Bulatov, D.V. Churikov and V.I. Shevyakov. Scanning probe microscopy cantilevers improvement for advanced research and manipulation at nano scale// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – Vol. 1461. – P. 012190. (Scopus).
13. V.Yu. Fominski , R.I. Romanov, I.S. Vasil'evskii, D.A. Safonov, A.A. Soloviev a, A.A. Ivanov, P.V. Zinin, S.Yu. Krasnoborodko, **Yu.E. Vysokikh**, V.P. Filonenko. Pulsed laser modification of layered B-C and mixed BCx films on sapphire substrate// Diamond & Related Materials. – 2021. – Vol. 114. – P. 108336. (Scopus)
14. **Yu. E. Vysokikh**, T.V. Mikhailova, S. Yu. Krasnoborodko, A.S. Kolomiitsev, O.I. Ilin, A.N. Shaposhnikov, V.N. Berzhansky, M.F. Bulatov, D.V. Churikov, V.I. Shevyakov, Carbon tip aperture cantilevers: Fabrication & features in near-field magneto-optical imaging// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. – Vol. 529. – P. 167837, ISSN 0304-8853 (Scopus, Web of Science)
15. T.V. Mikhailova, **Yu.E.Vysokikh**, A.N. Shaposhnikov, V.N. Berzhansky, S.Yu. Krasnoborodko, A.S. Lutovinov. Crystallization of Bi-substituted iron garnet bi-layers // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2086. – Art. N 012044. (Scopus)
16. T.V. Mikhailova, **Yu.E. Vysokikh**, A.N. Shaposhnikov, V.N. Berzhansky, S.Yu. Krasnoborodko, M.F. Bulatov, D.V. Churikov, A. Karavainikov and V.I. Belotelov. Crystallization Double-Layer Magneto-Active Films for Magnetophotonics// J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2091. – Art. N 012049. (Scopus)
17. A.V. Bykov, **Yu. E. Vysokikh**, V.S. Kartavtsev, S.Yu. Krasnoborodko. Requirements for engineering infrastructure of microand nanoelectronic components production// Наноиндустрия. - 2018. - № 5 (82). - С. 217-219. (БАК)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рандошкин В В 1992 Применение висмутсодержащих монокристаллических пленок ферритов-гранатов *Труды ИОФАН* 35 123–35
- [2] Смоленский Г А and Леманов В.В. 1975 *Ферриты и их техническое применение* (Ленинград: НАУКА)
- [3] Звездин А.К. and Котов В.А. 1988 *Магнитооптика тонких пленок* (Москва: НАУКА)
- [4] Тикадзуми С. 1987 *Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения* ed Р В Писарева (Москва: МИР)
- [5] Xichao Zhang et al 2020 Skyrmion-electronics: writing, deleting, reading and processing magnetic skyrmions toward spintronic applications *Journal of Physics: Condensed Matter* 32
- [6] Voronov A. A., Ignatyeva D. O., Gusev N. A., Vetoshko P. M., Lugovskoy N. V., Song Y. B V I 2021 Bismuth-substituted Iron Garnet Films for Magnetophotonics: Part B–Devices and Applications *Inorganic and Organic Thin Films: Fundamentals, Fabrication and Applications* 1 161–97
- [7] Berzhansky V N, Karavainikov A V., Mikhailova T V., Prokopov A R, Shaposhnikov A N, Shumilov A G, Lugovskoy N V., Semuk E Y, Kharchenko M F, Lukienko I M, Kharchenko Y M and Belotelov V I 2017 Nano- and micro-scale Bi-substituted iron garnet films for photonics and magneto-optic eddy current defectoscopy *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*
- [8] Prokopov A R, Vetoshko P M, Shumilov A G, Shaposhnikov A N, Kuz'michev A N,

Koshlyakova N N, Berzhansky V N, Zvezdin A K and Belotelov V I 2016 Epitaxial Bi-Gd-Sc iron-garnet films for magnetophotonic applications *Journal of Alloys and Compounds* 671 403–7

[9] Berzhansky V N, Karavainikov A V., Milyukova E T, Mikhailova T V., Prokopov A R and Shaposhnikov A N 2010 Synthesis and properties of substituted ferrit-garnet films for one-dimensional magnetophotonic crystals *Functional Materials* 17 120–6

[10] Vysokikh Y E, Shaposhnikov A N, Prokopov A R, Berzhansky V N, Karavainikov A V, Gerasimenko N N and Smirnov D I 2017 Magneto-optical, Structural and Surface Properties of RIB Sputtered (Bi,Ga)- substituted DyIG films *Materials Research Bulletin* 95 115–22

[11] Mironov V L 2004 *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*

[12] Hartmann U, Göddenhenrich T and Heiden C 1991 Magnetic force microscopy: Current status and future trends *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 101 263–70

[13] Dillon J F 1958 Observation of domains in the ferrimagnetic garnets by transmitted light *Journal of Applied Physics* 29 1286–91

[14] Vasiliev M, Alam M N-E, Kotov V A, Alameh K, Belotelov V I, Burkov V I and Zvezdin A K 2009 RF magnetron sputtered (BiDy)₃(FeGa)₅O₁₂:Bi₂O₃ composite garnet-oxide materials possessing record magneto-optic quality in the visible spectral region *Optics Express* 17 19519

[15] Vysokikh Y E, Shelaev A V, Shevyakov V I, Prokopov A R, Belov A N and Krasnoborod'ko S Y 2016 Study of functioning of the magneto-optical method as part of magnetic force microscopy *Nanotechnologies in Russia* 11 815–9

[16] Vysokikh Y E, Shevyakov V I, Shaposhnikov A N, Prokopov A R and Shelaev A V 2017 Integration of scanning near field polarization optical microscopy and atomic force microscopy for investigation of magnetic and ferroelectric materials *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)* 1445–8

[17] Vysokikh Y E, Krasnoborodko S Y, Kolomiytsev A S, Fedotov A A, Shaposhnikov A N, Bulatov M F, Churikov D V and Shevyakov V I 2019 Advanced aperture cantilevers made by focused ion beam for both magnetic domain structure and morphology investigation in high resolution magneto optical microscopy *Journal of Physics: Conference Series* vol 1410

[18] Shaposhnikov A N, Lyashko S D, Nedviga A S, Karavainikov A V, Yu Semuk E, Vysokikh Y E and Mikhailova T V 2019 Scanning probe microscopy investigation of iron garnet films for magnetoplasmonics *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* vol 699

[19] Nur-E-Alam M, Vasiliev M and Alameh K 2015 Synthesis, Characteristics, and Material Properties Dataset of Bi:DyIG-Oxide Garnet-Type Nanocomposites *Journal of Nanomaterials* 2015 1–9

[20] Berzhansky V N, Shaposhnikov A N, Prokopov A R, Karavainikov A V, Mikhailova T V., Semuk E Y, Sharipova M I, Dolgova T V., Fedyanin A A, Kotov V A and Golub V O 2011 One-dimensional magnetophotonic crystals based on double-layer Bi-substituted iron garnet films *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42 19–23

[21] Berzhansky V N, Mikhailova T V, Karavainikov A V, Prokopov A R, Shaposhnikov A N, Kharchenko Y M, Lukienko I M, Miloslavskaya O V, Kharchenko M F, Belotelov V I and Golub V O 2015 Microcavity One-Dimensional Magnetophotonic Crystals with Double Layer Bi-Substituted Iron Garnet Films: Optical and Magneto-Optical Responses in Transmission and Reflection Vladimir N. Berzhansky *Solid State Phenomena* 230 241–6

[22] Shaposhnikov A N, Prokopov A R, Karavainikov A V., Berzhansky V N, Mikhailova T V., Kotov V A, Balabanov D E, Sharay I V., Salyuk O Y, Vasiliev M and Golub V O 2014 Modification of Bi:YIG film properties by substrate surface ion pre-treatment *Materials Research Bulletin* 55 19–25