

УТВЕРЖДАЮ

Директор  
ФГБУН «Удмуртский федеральный  
исследовательский центр Уральского  
отделения Российской академии наук»

Д.ф.-м.н. профессор

М.Ю. Альес



2023 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Высоких Юрия Евгеньевича

«Магнитооптический метод в составе атомно-силовой микроскопии для исследования параметров поверхности и доменной структуры тонких пленок»,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация Высоких Ю.Е. посвящена разработке комплекса методов измерений характеристик тонких пленок ферромагнетиков с расширенными функциональными возможностями на основе сочетания магнитооптики и атомно-силовой микроскопии и апробация этих методов на примере феррит-гранатовых пленок.

**Актуальность** темы диссертационной работы определяется современными требованиями постоянно совершенствующихся технологий формирования и методов исследования тонких ферромагнитных пленок и многослойных систем на их основе. 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. Кроме того, 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.

Решение данных задач может быть достигнуто комбинацией методов магнитооптики и атомно-силовой микроскопии (АСМ), что дает возможность одновременного определения топографии поверхности и доменной структуры. При этом достижимое пространственное разрешение при определении доменной структуры превышает дифракционный предел оптической микроскопии из-за использования оригинальных немагнитных апертурных кантилеверов, что, в отличие от классического метода магнитно-силовой микроскопии (МСМ), исключает влияние на магнитную структуру образца магнитного поля кантилевера.

Объектами исследования являются перспективные для создания многослойных магнитооптических устройств и фотонных кристаллов феррит-гранатовые тонкие пленки, синтезированные методами реактивного ионно-лучевого распыления и отжига. Они имеют, в зависимости от режимов синтеза и термической обработки, различные структурные и морфологические, и, связанные с ними, магнитные и оптические свойства.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертационная работа Ю.Е. Высоких содержит 114 страниц, включая 72 рисунка, 5 таблиц, список литературы, который содержит 110 наименований, включая публикации по теме диссертации. Она состоит из введения, четырех глав и заключения, содержащего основные результаты и выводы по работе.

Диссертационная работа по содержанию и структуре отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна, практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит описание основных типов магнитных доменов ферромагнетиков, рассматривается влияние внешних факторов на их структуру (спиралевидная, сотовая, цилиндрическая, плоскопараллельная и лабиринтная) и свойства, такие как намагниченность, число осей лёгкого намагничивания; ориентация кристаллографических осей и пр. Отдельно рассматриваются методы получения ферромагнитных пленок на примере феррит-гранатов и их применение в различных направлениях физики, методы визуализации доменной структуры, такие как магнитооптический и атомно-силовая (магнитно-силовая) микроскопия.



Основная цель Главы 2 - выявление параметров кристаллизационного отжига однослойных и двухслойных пленок, которые позволили получить пленки с удовлетворительными оптическими (прозрачность), магнитооптическими (удельный угол фарадеевского вращения), структурными (степень кристалличности) свойствами и низкой шероховатостью (RMS) поверхности на подложках гадолиний галлиевого граната, кальций-магний-цирконий-гадолиний-галлиевого граната и  $\text{SiO}_2$ .

В Главе 3 изложены результаты разработки и апробирования комплекса методик, объединяющих технологии магнитооптической микроскопии и атомно-силовой микроскопии. В частности, указывается, что применение магнитных зондов при исследованиях МСМ может привести к перемагничиванию в системе зонд-образец, а также трудностям при измерениях с изменением параметров внешней среды, таких как изменение температуры (в частности – нагрев) и изменение магнитного поля. Предложенный комплекс методик позволяет одновременно исследовать топографию и магнитную доменную структуру прозрачных пленок ферримагнетиков без риска обратного влияния измерительной системы (магнитного кантилевера) на исследуемую магнитную структуру образца, с разрешением вплоть до оптического дифракционного предела. Также 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.

В Главе 4 проведено исследование апертурных кантилеверов, изготовленных ионно-ассистированным осаждением, и их применение для магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии в целях улучшения латеральной разрешающей способности. Получены данные о характеристиках поверхности и доменной структуры пленок феррита-граната, продемонстрирована возможность получения изображения высокого разрешения (100 нм) магнитной доменной структуры указанных ферримагнетиков с помощью магнитооптического метода в составе атомно-силовой микроскопии при использовании сформированной апертуры углеродного зонда диаметром до 50 нм.

В заключении диссертационной работы сформулирован общий результат работы, которым является разработка и апробация комплекса методик, объединяющих технологии магнитооптической микроскопии и атомно-силовой микроскопии и позволяющих одновременно исследовать топографию и магнитную доменную структуру прозрачных пленок ферримагнетиков 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.

#### **Научная новизна исследования.**

В данной диссертационной работе впервые предложен и апробирован комплекс методик, объединяющий технологии магнитооптической микроскопии и атомно-силовой микроскопии, что позволило исследовать топографию и магнитную доменную структуру прозрачных и непрозрачных пленок ферритмагнетиков без риска обратного влияния измерительной системы (магнитного кантилевера) на исследуемую магнитную структуру образца. Данный комплекс методик может быть реализован в одной установке.

Впервые для феррит-гранатовых пленок 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.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

В диссертации Высоких Ю.Е. получил ряд результатов, представляющих теоретический и практический интерес, среди которых следует отметить следующие:

- Разработанный комплекс методик позволяет системно исследовать ферритмагнитные тонкопленочные образцы, в том числе, непрозрачные, с целью определения состояния поверхности образца, обнаружения доменной структуры, выявления ее типа, в том числе в нанометровом диапазоне с субдифракционным разрешением. Следует отметить, что использование немагнитного апертурного кантилевера исключает риск перемагничивания образца.

- 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.

Положения, выносимые автором на защиту, и основные научные результаты получены впервые и являются оригинальными. Они вносят вклад в решение ряда вопросов, связанных с развитием методик атомно-силовой микроскопии, объединенных с методиками магнитооптики в одном техническом устройстве.

Результаты диссертации будет полезным использовать в организациях, занимающихся как разработкой и внедрением новых технических решений при создании атомно-силовых микроскопов нового поколения с расширенными функциональными возможностями, а также занимающихся разработкой и исследованиями ферромагнитных пленочных структур для магнитооптических модуляторов, оптические изоляторов, магнитных полевых датчиков и других магнитооптических устройств. Среди таковых можно отметить ООО «НТ-МДТ» (г. Зеленоград), ВИАМ (г. Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), СПбГУ (г. Санкт-Петербург), ЛЭТИ (г. Санкт-Петербург), ИТМО (г. Санкт-Петербург), ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), ЮФУ (г. Ростов-на-Дону), Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск), Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН (г. Ижевск), ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск), Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), МИЭТ (г. Москва), МИСиС (г. Москва).

По диссертации имеются следующие замечания:

1. На графиках, представляющих результаты исследований зависимости угла фарадеевского вращения и шероховатости от времени отжига (Рис.2.6., 2.11.) не представлены погрешности измерения величин.

2. На Рис.3.19 МСМ и АСМ представлены изображения доменной структуры дискеты и топографии поверхности. Направление топографической текстуры оказывается «повернутым» по отношению к направлению магнитной текстуры на  $90^\circ$ . В тексте диссертации не дается объяснения, почему так происходит.

3. При термической кристаллизации гранатовых пленок, судя по данным рентгеновской дифракции (Рис.2.7.), происходит рост кристаллитов в одном



преимущественном кристаллографическом направлении. Было бы более информативно его проиндексировать на дифрактограмме. Кроме того, нет объяснений причины такого роста. Это влияние подложки?

4. Автор диссертации приводит сведения о химическом составе исследуемых феррит-гранатовых пленок на основании состава распыляемых методом реактивного ионно-лучевого распыления мишеней. Было бы полезно провести аттестацию состава полученных образцов.

5. На Рис. 4.15 (д) показана увеличенная область, отраженная по сравнению с Рис. 4.15 (в) относительно нанесенной штриховой линии.

6. Диссертация представлена на соискание степени кандидата технических наук, в ней представлены некоторые оригинальные технические решения, которые могли быть запатентованы. Отсутствие патентов открывает потенциальным конкурентам путь к неконтролируемому использованию этих решений.

7. По крайней мере 2 вывода по работе и положения, выносимые на защиту, сформулированы обще и не отражают результаты исследования конкретных объектов, использованных в работе.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки большого объема проведенной экспериментальной и технической работы и качества ее апробации на феррит-гранатовых пленках различного состава.

**Достоверность** результатов и **научная обоснованность** выводов, представленных в диссертации, основывается на согласованности данных эксперимента, полученных с использованием современной экспериментальной техники. Основные результаты диссертации докладывались на международных и национальных научных конференциях и семинарах. Высоких Ю.Е. имеет 31 научную работу по теме диссертации, из которых 17 статьи в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и цитируемых в базах данных WoS и Scopus.

**Заключение по работе.** Представленная диссертация является самостоятельной научно-квалификационной работой, научная новизна, практическая значимость и оригинальность которой не вызывают сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и включает все представленные в диссертации задачи, выводы и результаты.

Таким образом, диссертационная работа «Магнитооптический метод в составе атомно-силовой микроскопии для исследования параметров поверхности и доменной структуры тонких пленок» удовлетворяет требованиям пунктов 9, 10, 11 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Высоких Юрий Евгеньевич, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертация Высоких Юрия Евгеньевича «Магнитооптический метод в составе атомно-силовой микроскопии для исследования параметров поверхности и доменной структуры тонких пленок» прошла обсуждение на заседании Объединенного семинара отделов физики и химии поверхности и физики и химии наноматериалов Физико-технического института ФГБУН ФИЦ УрО РАН «23» ноября 2023 года.

Ведущий научный сотрудник  
лаб. атомной структуры и анализа поверхности  
Отдела физики и химии поверхности  
Физико-технического института  
УдмФИЦ УрО РАН  
кандидат физико-математических наук,  
специальность 01.04.07 – физика твердого тела,

  
Валеев Ришат Галеевич

426067, г. Ижевск, ул. им. Т. Барамзиной, 34  
тел.9(3412)430163, e-mail: rishatvaleev@udman.ru  
« 29» ноября 2023 г.

Подпись Валеева Р.Г. заверяю  
Начальник отдела кадров



  
Воронцова О.С.