

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.185.01 (Д 002.135.01),
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
«НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УНИКАЛЬНОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ» РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ФГБУН НТЦ УП РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27 декабря 2023 года, №9

о присуждении **Высоких Юрию Евгеньевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация Высоких Юрия Евгеньевича «Магнитооптический метод в составе атомно-силовой микроскопии для исследования параметров поверхности и доменной структуры тонких пленок» по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики», принята к защите 25.10.2023 г., протокол №2, диссертационным советом 24.1.185.01 (Д 002.135.01) на базе ФГБУН НТЦ УП РАН, почтовый адрес: 117342 г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15. Совет функционирует на основании приказа Минобрнауки России №714/нк от 02.11.2012. После внесения частичных изменений состав утвержден приказом № 1253/нк от 27.11.2023 г. в количестве 17 человек.

Соискатель Высоких Юрий Евгеньевич, 1984 года рождения, окончил в 2006 году государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт электронной техники (технический университет)», с присвоением квалификации инженер по специальности «микроэлектроника и твердотельная электроника». В период подготовки диссертации соискатель Высоких Юрий Евгеньевич работал в ФГБУН Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН, в отделе акустооптических информационных систем, лаборатория наногradientной оптики, магнитных материалов и структур, в должностях младшего научного сотрудника, научного сотрудника. Диссертация выполнена в ФГБУН НТЦ УП РАН в Лаборатории наногradientной оптики, магнитных материалов и структур.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор института интегральной электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» Шевяков Василий Иванович.

Научный консультант – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела акустооптических информационных систем, лаборатории наногradientной оптики, магнитных материалов и структур ФГБУН НТЦ УП РАН Краснобородько Сергей Юрьевич.

Научный консультант назначен решением Ученого совета НТЦ УП РАН (протокол 34 от 25.02.22) в связи с тем, что большой объем диссертационного исследования выполнялся на экспериментальной базе НТЦ УП РАН, и соответствующие работы требовали научного

консультирования со стороны к.т.н. Краснобородько С.Ю., обладающего необходимыми компетенциями, знаниями и опытом. Под руководством Краснобородько С.Ю. соискателем подготовлены вторая и четвертая главы диссертации, содержащие результаты экспериментальных исследований.

Официальные оппоненты:

Бармина Екатерина Владимировна - доктор физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика», заведующий Лабораторией макрокинетики неравновесных процессов Научного центра волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» (филиал), г. Москва;

Павлов Илья Николаевич - кандидат технических наук по специальности 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы», доцент, доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

дали положительные отзывы на диссертацию и автореферат.

Ведущая организация – ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» в своем положительном заключении, подписанном кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории атомной структуры и анализа поверхности физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН Валеевым Р.Г. и утвержденным директором УдмФИЦ УрО РАН Альес М.Ю., указала, что «представленная диссертация является самостоятельной научно-квалификационной работой, научная новизна, практическая значимость и оригинальность которой не вызывают сомнений». Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, а ее автор достоин присуждения степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 - «Приборы и методы экспериментальной физики».

Соискатель имеет 31 опубликованную научную работу по теме диссертации, в том числе 17 в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. 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, 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).

3. 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).
4. 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. - Art. N 012224 (Scopus).
5. 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. – Art. N 012043. (Scopus).
6. 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. – Art. N 012030 (Scopus).
7. 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).
8. 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. – Art. N 012190. (Scopus).
9. Yu. E. Vysokikh, T.V. Mikhailova, S. Yu. Krasnoborodko, A.S. Kolomiytsev, 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. – Art. N 167837, ISSN 0304-8853 (Scopus, Web of Science)
10. 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)

Все вышеперечисленные опубликованные работы полностью соответствуют теме диссертационной работы и отражают её содержание. В диссертации разработан и апробирован комплекс методов, объединяющих технологии атомно-силовой микроскопии и магнитооптическую регистрацию локальных магнитных полей, который позволяет исследовать с субдифракционным пространственным разрешением топографию поверхности и магнитную доменную структуру прозрачных нанометровых пленок ферромагнетиков одновременно без риска обратного влияния инструмента – кантилевера – на исследуемую магнитную структуру образца. Разработанный метод допускает реализацию на одной установке и позволяет проводить как предварительные обзорные исследования на

масштабах сотни микрон с пространственным разрешением на уровне оптического дифракционного предела, так и детальные исследования выделенных субмикронных областей с пределом разрешения до 100 нм. Разработан вспомогательный метод создания оптически прозрачных магнитных реплик непрозрачных образцов с помощью высококоэрцитивных эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок с низкой температурой Кюри, который позволяет исследовать магнитную структуру непрозрачных пленок оптическими методами в проходящем свете. Исследована динамика изменений морфологических и магнитооптических характеристик 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, в процессе кристаллизационного отжига. Впервые показано, что существует оптимальная длительность отжига, составляющая от 10 до 20 минут и обеспечивающая достижение высоких магнитооптических характеристик при низкой шероховатости поверхности. Определены зависимости параметров шероховатости, размера зерен и угла фарадеевского вращения от способа кристаллизационного отжига для перспективных двуслойных структур на подложках гадолиний галлиевого граната и оксида кремния с составами слоев $\text{Bi}_{1,0}\text{Lu}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{2,5}\text{Gd}_{0,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Al}_{1,2}\text{O}_{12}$ и $\text{Bi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$.

В диссертационный совет поступили 6 отзывов на автореферат. Все отзывы положительные, 2 отзыва содержат замечания.

1. Фролов Александр Юрьевич, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, кафедра квантовой электроники, физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова:

- отсутствие отрицательного знака на шкале фарадеевского вращения на рисунке 1.
- не было показано влияния формы апертуры зонда на двумерные карты магнитооптического изображения в последней оригинальной главе.

2. Полулях Сергей Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой экспериментальной физики Физико-технического института, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»:

- не совсем корректно оформлены подписи к рисункам - они не отделены от основного текста (стр. 15-19).

Отзывы, не содержащие замечаний, поступили от следующих специалистов.

3. Запороцкова Ирина Владимировна, д.ф.-м.н., профессор, директор института приоритетных технологий «Волгоградского государственного университета».

4. Мосунов Андрей Алексеевич, к.ф.-м.н., в.н.с., и.о. заведующего лабораторией Молекулярной и клеточной биофизики «Севастопольского государственного университета».

5. Вайнштейн Илья Александрович, д.ф.-м.н., профессор, директор НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

6. Родионова Валерия Викторовна, к.ф.-м.н., директор НОЦ «Умные материалы и

биомедицинские приложения» и **Гриценко Кристина Александровна**, к.ф.-м.н., директор Высшей школы нанотехнологий и инженерии образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта.

На все указанные замечания к автореферату соискатель в процессе защиты дал аргументированные ответы. Во всех отзывах отмечается, что диссертационная работа Высоких Ю.Е. на тему «Магнитооптический метод в составе атомно-силовой микроскопии для исследования параметров поверхности и доменной структуры тонких пленок» является законченным научным трудом, имеющим важное научное и практическое значение. Автореферат соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 (ред. от 26.10.2023), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Высоких Юрий Евгеньевич достоин присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловлен следующим:

доктор физико-математических наук Бармина Е.В. и кандидат технических наук Павлов И.Н. являются высококвалифицированными специалистами в области оптики, лазерной физики, атомно-силовой микроскопии, активно работающими учеными и имеют публикации по темам, близким к теме диссертации;

сотрудники лаборатории атомной структуры и анализа поверхности физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН, где был подготовлен отзыв ведущей организации, хорошо знакомы с тематикой диссертационного исследования, работают в этой и смежных областях и имеют публикации по темам, близким к теме диссертации, а Валеев Ришат Галеевич, подписавший отзыв, является авторитетным российским ученым в области атомно-силовой микроскопии, магнитооптики, магнетизма и материаловедения.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований в диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработан и апробирован комплекс методов, объединяющий технологии магнитооптической микроскопии с атомно-силовой. Этот комплекс позволяет одновременно определять как топографию поверхности оптически прозрачных ферромагнитных пленок, так и их доменную структуру, причем без риска обратного влияния прибора (магнитного кантилевера) на образец.

2. Разработан и апробирован метод перенесения на оптически прозрачные пленки магнитной доменной структуры оптически непрозрачных пленок (создания реплик).

3. Определены зависимости угла фарадеевского вращения, параметров шероховатости, среднего размера зерен от длительности термообработки, способа кристаллизационного отжига и величины рассогласования параметров решеток пленки и подложки для перспективных феррит-гранатовых пленок состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$, а также

двуслойных 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 гадолиний галлиевого граната и оксида кремния. Показано наличие оптимального времени отжига, обеспечивающего максимальное значение параметра магнитооптической чувствительности при минимальной шероховатости пленок.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанный комплекс методов, объединяющий технологии атомно-силовой и магнитооптической микроскопии, позволяющий одновременно исследовать топографию и магнитную доменную структуру прозрачных пленок ферримагнетиков, делает возможным провести на одной установке полное исследование ферримагнитных тонкопленочных образцов, начинающееся с его крупномасштабного осмотра с целью определения состояния поверхности, обнаружения доменной структуры и выявления ее типа, переходящее в нанометровый диапазон масштабов, обеспечивающее измерения с субдифракционным разрешением. Использование немагнитного кантилевера, исключаяющее риск перемагничивания образца, позволяет исследовать образец многократно.

2. Разработанный метод получения магнитных реплик позволяет исследовать оптически непрозрачные образцы ферримагнитных пленок магнитооптическим методом, в частности определять их магнитную доменную структуру с высоким пространственным разрешением.

3. Выявленные и изученные закономерности формирования феррит-гранатовых пленок состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$ и 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 (SiO_2) и гадолиний галлиевого граната (GGG) от параметров технологического процесса могут быть использованы для совершенствования устройств на основе многослойных магнитооптических фотоннокристаллических сред (в частности магнитооптических модуляторов, оптических изоляторов, магнитных полевых датчиков) за счет оптимизации параметров пленок при их изготовлении.

Достоверность выводов диссертационной работы обоснована выбором и использованием известных и апробированных физических инструментов и экспериментальными измерениями.

Личный вклад соискателя. В диссертации Высоких Ю.Е. представлены результаты работы, выполненные им лично в лаборатории наноградиентной оптики, магнитных материалов и структур НТЦ УП РАН. Автор диссертации принимал непосредственное участие в планировании задач в соответствии с целью исследований, их решении и обсуждении полученных результатов. 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. и 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.

Диссертация охватывает основные аспекты поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивой методологической платформой, концептуальностью изложения и взаимосвязью выводов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, и соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ. В диссертационной работе представлено решение актуальной научной задачи разработки комплексного метода исследования тонких нанометровых ферромагнитных пленок, объединяющий атомно-силовую микроскопию с магнитооптической регистрацией локальных магнитных полей, который позволяет одновременно определять и микрорельеф поверхности, и магнитную доменную структуру с субдифракционным пространственным разрешением без риска перемагничивания образца в ходе исследования. Полученные результаты имеют существенное значение для развития фотоники, магнитооптики, оптоэлектроники, в частности для комплексного исследования магнитных тонкопленочных материалов. Разработанный комплекс методов, позволяет выявить новые закономерности и получить новые знания, которые будут использованы при создании элементной базы и устройств нанометрового масштаба на основе тонких пленок ферромагнетиков. Результаты работы используются в следующих организациях, представивших соответствующие акты о внедрении: ООО «НОВА СПБ», НИУ МИЭТ.

На заседании 27 декабря 2023 года диссертационный совет в соответствии с критериями «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждёнными Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 26.10.2023), принял решение присудить соискателю – Высоких Юрию Евгеньевичу – учёную степень кандидата технических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики». При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, их них - 7 докторов по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» по техническим наукам, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 13, против - 0, недействительных – 0.

Председатель диссертационного совета, д.ф.-м.н.

Пожар В.Э.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н.

Батшев В.И.

29.12.23

Подписи Пожара В.Э. и Батшева В.И. заверяю

Заместитель

директора



Д.В. Чуринов