

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Беляев Виктор Константинович**

**Магнитные, оптические и магнитооптические свойства  
магнитоплазмонных кристаллов**

Специальность 1.3.12 (01.04.11)

«Физика магнитных явлений»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2022

Работа выполнена в институте Физико-математических наук и информационных технологий Балтийского Федерального Университета имени Иммануила Канта.

**Научный руководитель**      **Родионова Валерия Викторовна**  
кандидат физико-математических наук,  
директор НОЦ "УМиБП", доцент БФУ  
им. И. Канта

**Официальные оппоненты**    **Юрасов Алексей Николаевич**  
доктор физико-математических наук,  
доцент, профессор кафедры  
нанoeлектроники ИПГИП, МИРЭА –  
Российский технологический  
университет

**Пудонин Федор Алексеевич**  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник, и.о. зав.  
лаборатории физики неравновесных  
явлений в неоднородных системах,  
ФИАН

**Хохлов Николай Евгеньевич**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории физики ферроиков ФТИ  
им. А.Ф. Иоффе

Защита диссертации состоится «16» июня 2022 года в 18:00 на заседании диссертационного совета МГУ.01.18 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

Email: [perov@magn.ru](mailto:perov@magn.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/452818156/>

Автореферат разослан «\_\_» мая 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Шапаева Т.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Технологический прогресс задает направления развития современных фундаментальных и прикладных исследований. В настоящее время активно развиваются направления, связанные с дизайном наноструктурных материалов для различных приложений. Особый интерес вызывают магнитные наноструктуры, позволяющие локализовать энергию оптического излучения на субдлинноволновых масштабах и добиться резонансного усиления магнитооптических эффектов. Исследование взаимосвязи магнитных и магнитооптических свойств таких наноструктур позволит прийти к пониманию механизмов взаимодействия света с магнитоактивными материалами, что является важной фундаментальной задачей. Для прикладных исследований это позволит разработать оптические вычислительные кластеры, системы обработки и хранения информации, а также новые типы чувствительных элементов датчиков физических величин.

Локализовать энергию оптического излучения можно при помощи магнитоплазмонных кристаллов (МПлК) – наноструктур, состоящих из благородных и ферромагнитных металлов, в которых возможно возбуждение и распространение поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) на границах раздела материалов с различными знаками диэлектрической проницаемости [1]. Возбуждение ППП в МПлК может быть реализовано за счёт дифракционной схемы [2], что позволяет усилить магнитооптические эффекты на два порядка величины за счет более эффективного взаимодействия электромагнитных волн с магнитоактивным материалом [3].

Полевые и спектральные зависимости усиленных за счет возбуждения ППП магнитооптических эффектов определяются свойствами МПлК, которые задаются составом и толщиной функциональных слоев, а также высотой и периодом дифракционной решетки. МПлК могут быть применены для повышения чувствительности датчиков концентрации [4], измерения напряженности магнитного поля [5] или для активного управления поляризацией и интенсивностью отраженного света в оптическом диапазоне длин волн [6]. Таким образом, исследование магнитных, оптических и магнитооптических свойств МПлК, а также установление механизмов формирования и взаимосвязи их свойств, является важной научной задачей, решению которой посвящена данная работа.

**Цель работы.** Исследовать механизмы формирования магнитных, оптических и магнитооптических свойств магнитоплазмонных кристаллов в зависимости от их параметров.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи:**

1. Изготовить и охарактеризовать структурно-морфологические свойства магнитоплазмонных кристаллов на основе дифракционных решеток, отличающихся периодом и высотой дорожек, с разными толщинами и составом функциональных слоев. Последовательности нанесения функциональных слоев: Ag/Fe/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Au/Fe/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Ag/Ni/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Au/Ni/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> или Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>.
2. Исследовать интегральные и локальные магнитные свойства магнитоплазмонных кристаллов. Определить механизмы формирования магнитных свойств и особенности процессов перемагничивания и размагничивания магнитоплазмонных кристаллов в зависимости от их параметров.
3. Разработать, собрать и автоматизировать установку для проведения исследований спектральных и полевых зависимостей оптических и магнитооптических свойств магнитоплазмонных кристаллов в оптическом и инфракрасном диапазоне длин волн при приложении переменного и постоянного магнитного поля.
4. Исследовать спектральные зависимости оптических и магнитооптических свойств магнитоплазмонных кристаллов в оптическом диапазоне длин волн. Установить эффективность усиления экваториального магнитооптического эффекта Керра за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов дифракционным методом в зависимости от параметров МПлК.
5. Исследовать зависимости магнитооптического отклика магнитоплазмонных кристаллов от напряженности переменного и постоянного магнитного поля. Установить механизмы влияния параметров магнитоплазмонных кристаллов на магнитооптические характеристики.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Увеличение толщины слоя железа с 5 до 100 нм в магнитоплазмонных кристаллах с последовательностью

функциональных слоев Ag(100 нм)/Fe/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(20 нм), нанесенных на дифракционную решетку с периодом 320 нм и высотой дорожек 20 нм, приводит к усилению экваториального эффекта Керра за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов с 0.97 до 4.64% в полях напряженностью до 25 Э. Существует алгоритм подбора материала и толщины ферромагнитного слоя, позволяющий уменьшить напряженность магнитного поля, в котором наблюдается максимальное значение экваториального эффекта Керра, до 7 Э.

2. Величина магнитооптического отклика в геометрии экваториального эффекта Керра от магнитоплазмонного кристалла на длине волны, соответствующей возбуждению поверхностных плазмон-поляритонов, прямо пропорциональна напряженности постоянного магнитного поля, приложенного сонаправлено модулирующему переменному магнитному полю фиксированной амплитуды.
3. Магнитный вклад в формирование магнитооптических свойств магнитоплазмонных кристаллов в геометрии экваториального эффекта Керра (формирование спектральных и полевых зависимостей магнитооптического отклика), является определяющим.
4. Неравномерное покрытие дорожек дифракционной решетки, имеющих высоту 100 нм, слоем железа толщиной 5 нм, приводит к появлению магнитостатического взаимодействия между магнитными фазами, сформированными железом, осажденным на нижнюю и на боковые грани дорожек, и железом, нанесенным на верхние части дорожек. Подобного поведения для магнитоплазмонных кристаллов на основе никеля не наблюдается.

**Научная новизна работы.** Впервые проведено систематическое исследование локальных и интегральных магнитных, а также оптических и магнитооптических свойств МПлК на основе тонкопленочных структур из благородных, ферромагнитных и диэлектрических материалов, нанесенных на поверхность дифракционных решеток; впервые исследована зависимость указанных

свойств МПлК от толщин и составов функциональных слоев, и параметров дифракционных решеток.

Продемонстрировано, что величина магнитооптического отклика МПлК, измеренная на длине волны, соответствующей возбуждению ППП, имеет сильную зависимость от напряженности внешнего постоянного и переменного магнитного поля. Полевая зависимость магнитооптического отклика имеет ступенчатую форму и определяется магнитными свойствами МПлК.

Установлено влияние магнитного, оптического и плазмонного вкладов в формирование полевой зависимости магнитооптического отклика МПлК в геометрии экваториального эффекта Керра. Продемонстрировано, что величина магнитооптического отклика при выполнении условий возбуждения ППП определяется напряженностью постоянного магнитного поля, приложенного к магнитоплазмонному кристаллу, сонаправлено модулирующему переменному магнитному полю фиксированной амплитуды.

Впервые показана корреляция полевых зависимостей величины магнитооптического отклика с процессами размагничивания МПлК в магнитном поле с плавно уменьшающейся амплитудой. Исследована зависимость магнитооптического отклика от напряженности постоянного магнитного поля при приложении переменного магнитного поля фиксированной амплитуды.

**Достоверность результатов.** Результаты, представленные в данной работе, получены на современном измерительном оборудовании. Достоверность результатов также обеспечена использованием взаимодополняющих методик и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований. Представленные экспериментальные данные согласуются с имеющимися в литературе данными других научных групп в области исследования свойств наноструктурных материалов.

**Практическая значимость работы.** Результаты комплексных и систематических исследований влияния параметров МПлК на их магнитные, оптические и магнитооптические свойства позволяют дать научно-обоснованные рекомендации по изготовлению наноструктурных материалов с заданными магнитными характеристиками, что обуславливает интерес к использованию их в различных устройствах микро- и наноэлектроники.

В ходе выполнения работы автором была собрана и автоматизирована установка для проведения исследований спектральных и полевых зависимостей интенсивностных и поляризационных оптических и магнитооптических эффектов в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. Установка используется как в научной, так и в образовательной деятельности НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения».

В ходе выполнения работы было показано, что МПлК может быть использован в качестве чувствительного элемента датчика постоянного магнитного поля с чувствительностью до  $3.6 \cdot 10^{-6}$  Э на области измерений  $1 \text{ мм}^2$ ; теоретический предел составляет  $10^{-7}$  Э на области  $5 \text{ мкм}^2$ . Датчик магнитного поля на основе МПлК может быть использован в магнитной дефектоскопии и точечных диагностических устройствах. Его основными преимуществами являются высокая чувствительность, возможность изменять размер области, с которой снимаются данные, и возможность проведения топографирования постоянного магнитного поля. На датчик постоянного магнитного поля на основе МПлК был получен патент на изобретение. Разработана методика топографирования постоянного магнитного поля при помощи датчика магнитного поля на основе МПлК.

**Апробация работы.** Результаты диссертации были представлены лично автором в виде устных и стендовых докладов на 16 международных и российских конференциях. В том числе: Moscow International Symposium on Magnetism, Москва, Россия, июнь 2014; Italian School on Magnetism, Милан, Италия, апрель 2016; IEEE Magnetics Society Summer School 2016, Тохоку, Япония, июль 2016; Moscow International Symposium on Magnetism, Москва, Россия, июнь 2017; International Baltic Conference on Magnetism: Focus on Biomedical Aspects, Светлогорск, Россия, август 2017; 11<sup>th</sup> International Conference of Electrical, Transport, and Optical Properties on Inhomogeneous Media, Краков, Польша, июль 2018; Magnetics and Optics Research International Symposium 19, Прага, Чехия, июнь 2019; Current Trends in Cancer Theranostics 5.0, Вильнюс, Литва, июль 2019; SPIE Nanoscience + Engineering, Сан-Диего, США, август 2020; IV International Baltic Conference on Magnetism, Светлогорск, Россия, август 2021; The XXV Saratov Fall Meeting, Саратов, Россия, сентябрь 2021.

Исследования по теме диссертации были поддержаны грантами: УМНИК от ФСР №0018257; грантами РФФИ мол\_нр №15-32-50816, №16-32-50189 и мол\_а №16-32-00789; грантом РФФИ №22-22-00997. В настоящее время, работа по развитию идей, сформированных на основании результатов, полученных в ходе выполнения диссертационных исследований, продолжаются в рамках грантов от РФФИ № 22-22-00997 и МОН № 13.2251.21.0143.

**Публикации.** Основные результаты работы являются оригинальными, они опубликованы в 12 печатных работах, 9 из которых индексируются в базах данных Web of Science и Scopus. В числе 12 печатных работ, 1 патент и 2 тезисов докладов.

**Личный вклад автора.** Постановка цели и задач диссертационного исследования, и построение плана проведения экспериментальных работ были выполнены автором совместно с научным руководителем Родионовой В.В при участии сотрудников МГУ имени М.В. Ломоносова Грунина А.А. и Федянина А.А. Экспериментальные исследования магнитных, оптических и магнитооптических свойств были проведены лично автором работы, либо студентами под руководством автора, либо при непосредственном участии автора работы в проведении эксперимента. Исследования, проведенные методами магнитной силовой микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и Керр-микроскопии выполнены совместно с соавторами публикаций. 7 статей написано преимущественно автором работы; в остальных, вклад автора – существенный. Обработка и анализ данных, полученных при проведении экспериментальных исследований, выполнены автором работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы, которые изложены на 114 страницах. В тексте диссертации содержится 62 рисунка и 7 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 141 статью.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проведения исследования по теме диссертационной работы, обсуждена новизна и ее практическая значимость. В нем сформированы задачи, которые



необходимо решить для достижения поставленных целей и изложены положения, выносимые на защиту; обсужден личный вклад автора и достоверность полученных результатов.

**В первой главе** показано, что создание и исследование магнитных наноструктурных материалов вызывает большой интерес в современном научном мире. Существует класс наноструктур – МПЛК, в которых наблюдается усиление магнитооптических эффектов за счет возбуждения ППП. МПЛК перспективны в качестве чувствительных элементов датчиков магнитного поля. Приведены примеры датчиков переменного магнитного поля с МПЛК в качестве чувствительного элемента для различных приложений.

**Во второй главе** подробно описана методика создания образцов, в том числе полная пробоподготовка подложек и выбор технологических параметров изготовления. МПЛК были созданы в два этапа: изготовление полимерных дифракционных решеток из коммерческих цифровых дисков Blu-Ray Disc (BD) и Digital Versatile Disc (DVD) с последующим нанесением на них материалов функциональных слоев методом ионно-плазменного напыления (ИПН) или магнетронного распыления (МР). Функциональные слои МПЛК: (i) благородный металл (Ag, Au), необходимый для увеличения длины свободного пробега ППП и исключающий окисление ферромагнитного слоя со стороны подложки; (ii) ферромагнитный металл (Fe, Ni, Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>), обеспечивающий высокую магнитооптическую активность в магнитных полях со слабой напряженностью; (iii) защитный слой из прозрачного в оптическом диапазоне длин волн диэлектрика – Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, предотвращающего окисление ферромагнитного слоя.

В каждом цикле напыления создавались образцы на подложках, изготовленных из гладких кремниевых пластин Si[100] или SiO<sub>2</sub>, а также BD дисков (Sub<sub>2</sub>) и DVD дисков (Sub<sub>3</sub>), на поверхности которых имеются полимерные дифракционные решетки с квазисинусоидальным и трапецивидным профилем дорожек. Параметры дифракционных решеток: периоды  $d_2=320$  нм и  $d_3=740$  нм, ширина дорожек  $w_2=220$  нм и  $w_3=470$  нм, высота дорожек  $h_2=20$  нм и  $h_3=100$  нм. Всего было изготовлено 5 серий образцов, различающихся материалами и толщинами функциональных слоев. В кратком виде, серии образцов можно записать в виде – **№1: Ag/Fe/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, №2: Au/Fe/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, №3: Ag/Ni/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, №4: Au/Ni/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, №5: Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>**. Методом

ИПН изготовлены серии образцов №1-4, для которых были выбраны следующие толщины функциональных слоев: благородный металл – 100 нм, ферромагнитный металл – 100, 50, 20 или 5 нм, диэлектрический слой – 5, 20, 30 или 40 нм. Серия №5 была изготовлена методом МР, толщина ферромагнитного слоя составила 100 или 130 нм.

Характеризация образцов выполнена методами сканирующей электронной микроскопии, совмещенной с фокусированным ионным пучком (СЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ). Магнитные свойства измерены методами вибрационной и Керр-магнитометрии в геометрии меридионального эффекта Керра (ВМ и МЭК, соответственно). Изображения магнитной микроструктуры получены методами Керр-микроскопии и магнитно-силовой микроскопии. Исследование спектральных и полевых зависимостей оптических свойств и магнитооптического отклика в геометрии экваториального эффекта Керра (ЭЭК) выполнено методом частотно-угловой спектроскопии коэффициента отражения на установке, собранной и автоматизированной автором в ходе выполнения данной работы.

**Третья глава** посвящена описанию результатов характеризации структурных свойств созданных образцов, исследованию их магнитных свойств, микромагнитной структуры, спектральных и полевых зависимостей коэффициента отражения и ЭЭК. В главе выделено три раздела.

**В первом разделе** главы показаны результаты характеризации изготовленных образцов. Методами АСМ и СЭМ получены изображения морфологии поверхности и поперечные изображения МПлК, изготовленных на подложках Sub<sub>2</sub> и Sub<sub>3</sub>. Примеры полученных изображений приведены на Рис. 1.

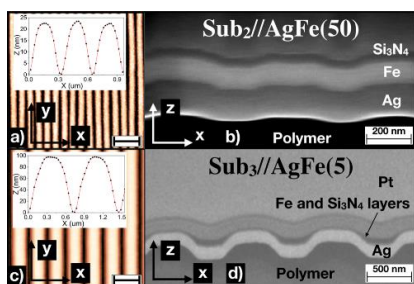


Рис.1 (а, с) – снимки поверхности МПлК, полученные методом АСМ, (b, d) – изображения поперечных сечений МПлК, изготовленных на подложках Sub<sub>2</sub> и Sub<sub>3</sub>, полученные методом СЭМ [А7].

Полученные методом АСМ изображения показали, что параметры дифракционных решеток не меняются после нанесения функциональных слоев и соответствуют заявленным. Методом СЭМ удалось установить, что материалы функциональных слоев равномерно покрывают поверхность подложек Sub<sub>2</sub>. Для образцов на подложках Sub<sub>3</sub> методом ПЭМ были получены дополнительные изображения, которые показали, что толщина функциональных слоев неравномерно распределяется по сечению дифракционной решетки. На примере МПлК с составом Sub<sub>3</sub>//Ag(100)/Fe(5)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(20) было показано, что слой железа неравномерно покрывает поверхность дорожек: в пространстве между дорожками дифракционной решетки осаждено 75% ферромагнитного материала, а оставшиеся 25% покрывают верхние части дорожек [A1].

Во втором разделе приведены результаты исследования магнитных свойств образцов. Продемонстрировано, что образцы, изготовленные на подложках Sub<sub>1</sub>, обладают изотропными в плоскости магнитными свойствами, в то время как у МПлК присутствует наведенная рельефом анизотропия магнитных свойств, причем, ось легкого намагничивания (ОЛН) сонаправлена дорожкам на подложке, а ось трудного намагничивания перпендикулярна им [A9]. При измерении магнитооптического отклика от МПлК, резонансное усиление ЭЖ возможно только при приложении магнитного поля вдоль ОЛН, поэтому в работе основное внимание уделено исследованиям магнитных свойств образцов вдоль ОЛН [A8]. Примеры измеренных петель гистерезиса показаны на Рис.2.

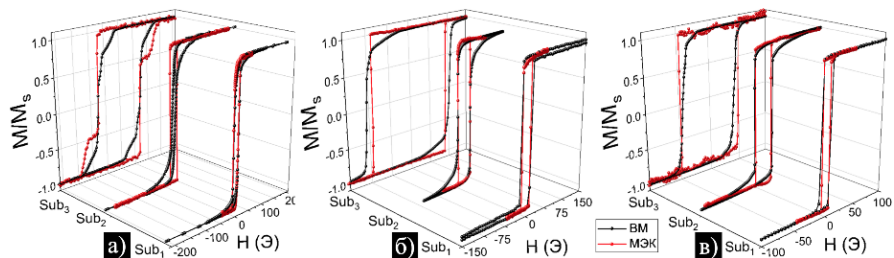


Рис.2. Петли гистерезиса, полученные ВМ и МЭЖ вдоль ОЛН для образцов на подложках Sub<sub>1</sub>, Sub<sub>2</sub> и Sub<sub>3</sub>, из серии №1 с толщинами Fe а) 100, б) 50 и в) 5 нм [A7].

Анализ результатов проведенных исследований показал, что увеличение отношения высоты дорожек дифракционной решетки к их ширине приводит к увеличению магнитной анизотропии магнитоплазмонной структуры ( $Sub_1 \rightarrow Sub_2 \rightarrow Sub_3$ ) и сопровождается ростом коэрцитивной силы ( $H_c$ ). Также продемонстрирован рост  $H_c$  при уменьшении толщины ферромагнитного слоя в рамках серий образцов №1-4 за счет изменения типа доменных стенок с блоховских на неелевские [A3, A7]. Для образцов из серии №5  $H_c$  растет при увеличении толщины ферромагнитного слоя за счет уширения доменных границ [A4, A6].

Петля гистерезиса МПлК  $Sub_3//Ag(100)/Fe(5)/Si_3N_4(20)$  имеет ступенчатую форму. Появление ступеньки обусловлено взаимодействием магнитных фаз, сформированных железом, неравномерно покрывающим поверхность  $Sub_3$ . Наблюдаемые на экспериментально измеренной петле гистерезиса поля переключения в 72 Э и 127 Э соответствовали переключению 75% и 25% ферромагнитного материала, что хорошо согласуется с объемом железной пленки, нанесенной на нижние и боковые, и верхние части одного периода. Данное предположение было проверено и подтверждено путем измерения и моделирования диаграмм обратных кривых перемагничивания первого порядка. Установлено, что формируются две магнитные фазы, сформированные (i) железом, осажденным на нижнюю и на боковые грани дорожек, и (ii) железом, нанесенным на верхние части дорожек. Экспериментально измеренная методом МЭК и рассчитанная петли гистерезиса для данного образца и схематическое изображение распределения намагниченности в диапазоне полей от 70 до 120 Э показаны на Рис.3.

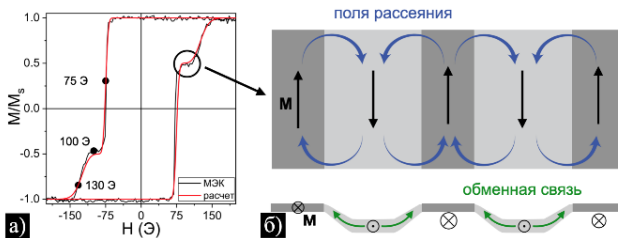


Рис. 3. Панель а) – петля гистерезиса вдоль ОЛН для  $Sub_3//Ag(100)/Fe(5)/Si_3N_4(20)$ . Панель б) – схематическое изображение распределения намагниченности в диапазоне полей от 70 до 120 Э [A1].

В третьем разделе показаны результаты исследования спектральных зависимостей коэффициента отражения и ЭЭК, а также полевых зависимостей магнитооптического отклика. Величина ЭЭК определена как  $\delta(\lambda)=R_{\pm H}/R_0$ , где  $R_0$  коэффициент отражения в отсутствии магнитного поля, а величина  $R_{\pm H}=R_{+H}-R_{-H}$  измеряется методом синхронного детектирования в переменном магнитном поле.

Положение дифракционных провалов в спектральных зависимостях коэффициента отражения для МПЛК совпадает с рассчитанными по формуле Френеля:  $m\lambda=d(\sin(\theta)\pm 1)$ , где  $m$  – порядок дифракции,  $\theta$  – угол падения света,  $\lambda$  – длина волны света, а  $d$  – период дифракционной решетки на подложке. Учитывая, что в данной работе исследование спектральных зависимостей проводилось в диапазоне длин волн от 400 нм до 850 нм при фиксированном угле падения света в  $68^\circ$ , дифракция для МПЛК на подложках Sub<sub>2</sub> и Sub<sub>3</sub> наблюдалась на –1 и –2 порядках [A2, A3, A8]. Примеры спектральных зависимостей коэффициента отражения и ЭЭК для образцов из серии №5 показаны на Рис.3.

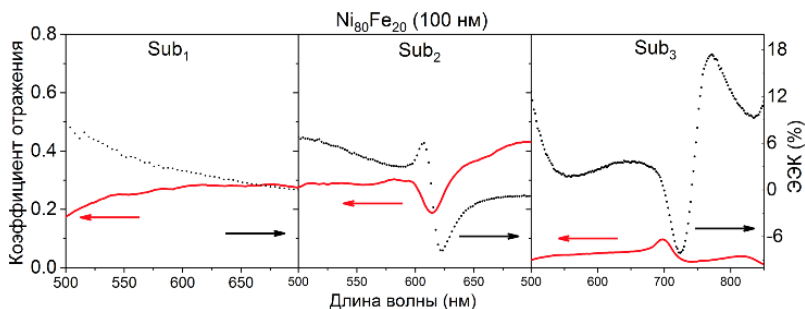


Рис.3. Примеры спектральных зависимостей коэффициента отражения и ЭЭК для образцов из серии №5 [A6].

В спектральных зависимостях коэффициента отражения и ЭЭК для образцов на подложках Sub<sub>1</sub> никаких особенностей не обнаружено, в то время как для МПЛК на подложках Sub<sub>2</sub> и Sub<sub>3</sub> виден провал на длинах волн, соответствующих выполнению условий дифракции. На данных длинах волн часть энергии дифрагированного света локализуется на границе раздела воздух/ферромагнетик и переходит в энергию ППП. За счет локализации энергии наблюдается

несимметричный резонанс Фано в спектральных зависимостях ЭЭК для МПлК на подложках Sub<sub>2</sub> и Sub<sub>3</sub>. Усиление ЭЭК в узкой спектральной области, рассчитанное как  $\Delta\delta = \delta_{max} - \delta_{min}$ , на два порядка выше соответствующей величины для образца на Sub<sub>1</sub>.

Исследование полевых зависимостей магнитооптического отклика в геометрии ЭЭК выполнялось на резонансной длине волны,  $\lambda_{res}$ , при уменьшении амплитуды воздействующего магнитного поля. Измерения начинались в магнитном поле напряженностью  $H_{sat}$ , достаточном, чтобы привести образец в состояние насыщения для того, чтобы исключить влияние начальной намагниченности на результат измерений. Полученные величины пересчитывались в отношение амплитуды сигнала к шуму,  $SNR_{AC} = R(\pm H) / \sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение шума, измеренного на  $\lambda_{res}$ , в насыщающем поле,  $H_{sat}$ , в течении 1500 секунд с временем усреднения 3 секунды на точку [А6, А8]. Форма измеренных полевых зависимостей магнитооптического отклика определяется изменением магнитного момента и коррелирует с величиной  $\Delta M$ , рассчитанной при размагничивании вдоль ОЛН как  $\Delta M(H_n) = M(+H_n) - M(-H_n)$ , т.е. как разница между максимальным и минимальным магнитным моментом для каждой  $n$ -той частной петли гистерезиса [А2, А3]. На Рис.4. показан набор частных петель гистерезиса, полученных при размагничивании МПлК, рассчитанные зависимости  $\Delta M$  и полевые зависимости магнитооптического отклика для образцов из серии №3.

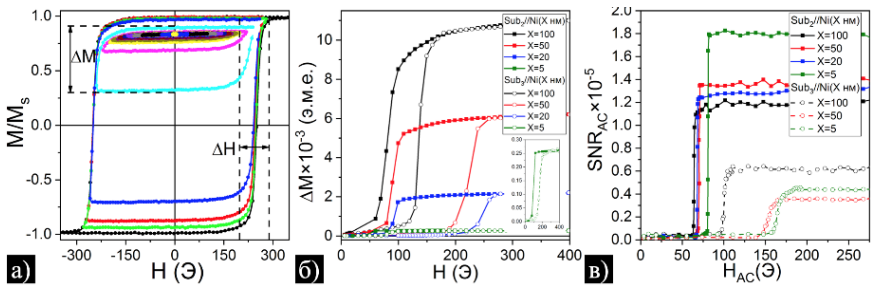


Рис.4. а) – частные петли гистерезиса, полученные при размагничивании образца Sub<sub>3</sub>//Ag(100)/Ni(100)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(20). б) – зависимости  $\Delta M(H)$  и в) – полевые зависимости магнитооптического отклика для МПлК из серии №3 [А3].

Продемонстрировано, что форма полевой зависимости магнитооптического отклика определяется изменением магнитного момента при размагничивании МПлК. Из полученных зависимостей были определены: диапазон магнитного поля, в котором наиболее резко меняется магнитооптический отклик,  $\Delta H$  – полная ширина на полувысоте  $\partial SNR_{AC}/\partial H_{AC}$  и  $H_{mod}$  – как максимум рассчитанной производной.

**Четвертая глава** посвящена результатам исследования зависимости магнитооптического отклика от напряженности постоянного магнитного поля на МПлК из серии №1 на подложках Sub<sub>2</sub>. Основными преимуществами выбранных МПлК являются высокие значения магнитного момента, коэффициента прямоугольности и величины ЭЭК. Для проведения исследований, установка по изучению спектральных и полевых зависимостей оптического и магнитооптического отклика, была модифицирована путем включения в ее состав дополнительной пары электромагнитов, позволяющих создавать постоянное магнитное поле, сонаправленное переменному. Методика подготовки и проведения эксперимента по измерению зависимостей магнитооптического отклика от напряженности постоянного магнитного поля включала следующие шаги: (i) измерение спектральных зависимостей коэффициента отражения и ЭЭК, определение  $\lambda_{res}$ ; (ii) измерение зависимости магнитооптического отклика от напряженности переменного магнитного поля на  $\lambda_{res}$ , определение  $H_{mod}$ ; (iii) измерение зависимости магнитооптического отклика от напряженности постоянного магнитного поля,  $SNR_{DC}$  при фиксированном значении амплитуды переменного поля  $H_{mod}$ . Для оценки влияния магнитного, оптического и плазмонного вкладов на полевые зависимости магнитооптического отклика МПлК были рассчитаны величины  $\Delta\delta/\Delta H$  и  $max(SNR_{AC})$ . Величина  $\Delta\delta/\Delta H$  определяется магнитными и магнитооптическими свойствами образцов. Величина  $max(SNR_{AC})$  соответствует максимальному значению  $SNR_{AC}$  в магнитном поле насыщения. Графически, величины  $H_{mod}$ ,  $\Delta SNR$  и  $\Delta H$ , полевые зависимости  $SNR_{AC}$ ,  $SNR_{DC}$  и  $\Delta M$  для образца Sub<sub>2</sub>\Ag(100)\Fe(100)\Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(20), а также зависимости  $\Delta\delta/\Delta H$  и  $max(SNR_{AC})$  от толщины ферромагнитного слоя, рассчитанные для МПлК из серии образцов №1, показаны на Рис.5.

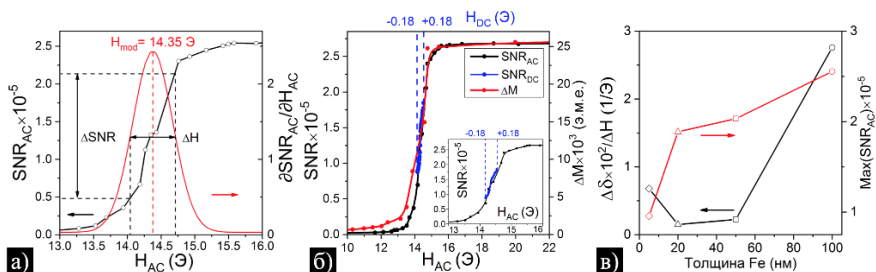


Рис.5. а) – графическое определение величин  $H_{mod}$ ,  $\Delta SNR$  и  $\Delta H$ ; б) – зависимости  $SNR_{AC}$ ,  $SNR_{DC}$  и  $\Delta M$  для образца  $Sub_2 \backslash \backslash Ag(100) \backslash Fe(100) \backslash Si_3N_4(20)$ ; в) – величины  $\Delta\delta/\Delta H$  и  $max(SNR_{AC})$ , рассчитанные для МПлК на  $Sub_2$  из серии образцов №1 [A2].

Разработанная методика измерения зависимости магнитооптического отклика от постоянного магнитного поля в геометрии ЭЭК позволяет переводить значение напряженности магнитного поля в изменение интенсивности отраженного света и наоборот. Таким образом, МПлК может быть использован как чувствительный элемент датчика магнитного поля, чувствительность которого может быть рассчитана как  $\Delta H / \Delta SNR$ . Для образцов на подложках  $Sub_2$  из серии №1, при толщине железа 100, 50, 20 и 5 нм, она составляет  $3.7 \cdot 10^{-6}$ ,  $3.2 \cdot 10^{-5}$ ,  $3.4 \cdot 10^{-5}$  и  $3.8 \cdot 10^{-5}$  Э, соответственно [A2, П1]. Чувствительность датчика на основе МПлК определяется конкуренцией магнитного, оптического и плазмонного вкладов. Увеличение толщины железного слоя приводит к увеличению магнитного момента, в то время как ее уменьшение положительно сказывается на оптических свойствах за счет уменьшения поглощения в ферромагнитном слое. Величина  $max(SNR_{AC})$  монотонно увеличивается с ростом толщины железного слоя. Зависимость величины  $\Delta\delta/\Delta H$  носит немонотонный характер – при толщине ферромагнитного материала намного меньше толщины скин слоя, возбуждаемый на границе раздела железа и нитрида кремния, ППП достигает функционального слоя из серебра. За счет этого увеличивается длина его свободного пробега и время взаимодействия с ферромагнитным слоем, что приводит к росту величины  $\Delta\delta/\Delta H$  [A2].



С помощью разработанной методики было выполнено топографирование магнитного поля, создаваемого проводом с током, спиральной катушкой и системой постоянных магнитов [Т1, Т2]. Спиральная катушка, использованная в эксперименте, состояла из 12 витков с внешним диаметром 15 мм. Во время измерения, через катушку пропускался ток силой 400 мА. Топографирование было выполнено путем перемещения спиральной катушки в плоскости ХУ в квадратной области со стороной 23 мм на расстояниях Z в 9, 10.5, 12 и 13.5 мм. Измерения выполнялись построчно с шагом 1 мм, по 10 секунд/точку. Результат топографирования постоянного поля, создаваемого спиральной катушкой, показан на Рис.6.

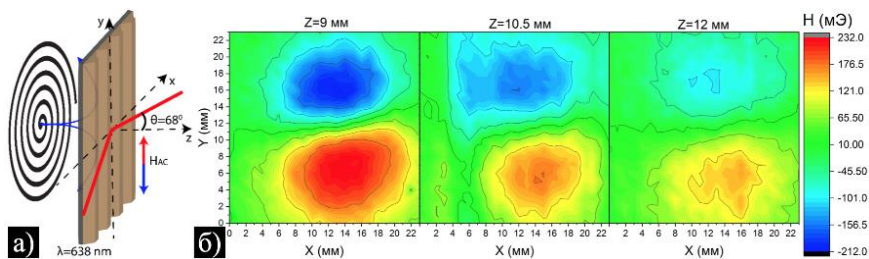


Рис.6. Схематичное изображение источника магнитного поля. Пространственные распределения постоянного магнитного поля, создаваемого плоской катушкой при разных расстояниях до точки падения светового пучка на МПлК [Т1, Т2].

Сравнение полученных величин чувствительности и локальности датчика, физические основы которого разработаны в рамках работы над диссертацией, с существующими датчиками магнитного поля, а также возможность топографирования магнитного поля, позволяет говорить, что датчик магнитного поля на основе МПлК может найти свое применение в магнитной дефектоскопии или в биомедицинских приложениях [А5].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлены механизмы формирования магнитных свойств и оценены магнитные характеристики МПлК, созданных методами ионно-плазменного напыления или магнетронного распыления. Продемонстрировано, что магнитные свойства референсных образцов на гладких подложках изотропны в плоскости, в то время как у МПлК формируется наведенная рельефом одноосная анизотропия магнитных свойств в плоскости структуры. Экспериментально показано, что увеличение отношения высоты дорожек дифракционной решетки к их ширине приводит к росту коэрцитивной силы ( $H_c$ ) МПлК вдоль ОЛН за счет усиления наведенной рельефом магнитной анизотропии. Для МПлК, изготовленных на полимерных дифракционных решетках (i) с периодом 320 нм и высотой дорожек 20 нм, и (ii) с периодом 740 нм и высотой дорожек 100 нм,  $H_c$  монотонно растет для следующих последовательностей материалов и толщин функциональных слоев за счет изменения типа доменных границ с блоховских на неелевские:
  - Ag/Fe(100→5 нм)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $H_c$ : (i) 12→16 Э; (ii) 48→126 Э.
  - Au/Fe(100→5 нм)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $H_c$ : (i) 2→7 Э; (ii) 46→83 Э.
  - Ag/Ni(100→20 нм)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $H_c$ : (i) 80→97 Э; (ii) 181→234 Э
  - Au/Ni(100→20 нм)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $H_c$ : (i) 92→112 Э; (ii) 163→235 Э.С увеличением толщины слоя Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> с 100 до 130 нм, ( $H_c$ ) растет (i) 10→16 Э и (ii) 37→45 Э за счет уширения доменных границ блоховского типа. Наиболее резкое изменение полевой зависимости магнитооптического отклика происходит в магнитных полях с напряженностью меньше ( $H_c$ ).
2. Неравномерное покрытие дифракционной решетки с периодом 740 нм и высотой дорожек 100 нм, слоем железа толщиной 5 нм, приводит к появлению магнитостатического взаимодействия между магнитными фазами, сформированными железом, осажденным на нижнюю и на боковые грани дорожек, и железом, нанесенным на верхние части дорожек, что выражается в ступенчатой форме петли гистерезиса с полями переключения 72 и 127 Э. Была построена феноменологическая модель, которая подтверждается результатами измеренных и рассчитанных

диаграмм обратных кривых перемагничивания первого порядка, и анализом магнитной микроструктуры при перемагничивании магнитоплазмонного кристалла. Подобного поведения для магнитоплазмонных кристаллов на основе никеля не наблюдается.

3. В ходе выполнения работы была собрана и автоматизирована установка для проведения исследований интенсивных и поляризационных оптических и магнитооптических эффектов в диапазоне длин волн от 350 нм до 8 мкм при температурах от 80 до 310 К с возможностью приложения постоянного и переменного магнитного поля напряженностью до 500 Э. Исследования спектральных и полевых зависимостей оптического и магнитооптического откликов, результаты которых представлены в данной диссертационной работе, в основном были проведены на собранной установке.
4. Усиление экваториального эффекта Керра достигается за счет возбуждения ППП в МПлК, состоящих из (i) 100 нм серебра, 5, 20, 50 или 100 нм железа или никеля и 20 нм нитрида кремния или (ii) пермаллоя толщиной 100 или 130 нм, нанесенных на поверхности полимерных дифракционных решеток с периодами 320 или 740 нм и высотами дорожек 20 или 100 нм. Для МПлК наблюдается резонанс типа Фано в спектральных зависимостях ЭЭК. Резонансная длина волны  $\lambda_{res}$ , на которой наблюдается максимальное усиление эффекта Керра при фиксированном угле падения  $68^\circ$ , составила величину  $620 \pm 10$  нм и  $715 \pm 10$  нм. ЭЭК эффективней усиливается на МПлК с меньшей высотой дорожек. Максимальное значение величины ЭЭК достигается в окрестности  $\lambda_{res}$ , и в узкой спектральной области может меняться на величину  $\Delta\delta = \delta_{max} - \delta_{min}$ . Для МПлК, изготовленных на дифракционных решетках с высотой дорожек 20 нм, величины  $\delta$  и  $\Delta\delta$  и растут для следующих последовательностей материалов и толщин функциональных слоев за счет увеличения намагниченности ферромагнитного слоя:
  - Ag/Fe(5→100 нм)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $\delta$ : 0.97→4.64%;  $\Delta\delta$ : 1.26→2.41%.
  - Ag/Ni(5→100 нм)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $\delta$ : 0.41→0.43%;  $\Delta\delta$ : 0.37→0.64%.
  - Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(100→130 нм),  $\delta$ : 0.75→0.77%;  $\Delta\delta$ : 1.38→1.43%.
5. Полевая зависимость магнитооптического отклика определяется комбинацией (i) магнитного, (ii) оптического и плазмонного

вкладов. С увеличением толщины ферромагнитного слоя: (i) растет величина намагниченности насыщения, уменьшается значение коэрцитивной силы и сужается диапазон магнитных полей, в которых наблюдается наиболее резкое изменение полевой зависимости магнитооптического отклика ( $\Delta H$ ); (ii) увеличивается количество оптических потерь и уменьшается длина свободного пробега ППП. Для серий МПлК на основе Fe и  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ , увеличение толщины ферромагнитного слоя приводит к росту величины магнитооптического отклика в насыщающем магнитном поле,  $\max(SNR_{AC})$ , и уменьшению величины  $\Delta H$  за счет роли (i) вклада:

- Ag/Fe(5→100 нм)/ $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\max(SNR_{AC}) \cdot 10^5$ : 0.59→2.59;  $\Delta H$ : 1.2→0.6 Э.
- Ag/Ni(5→100 нм)/ $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\max(SNR_{AC}) \cdot 10^5$ : 1.20→1.79;  $\Delta H$ : 4.3→3.3 Э.
- $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (100→130 нм),  $\max(SNR_{AC}) \cdot 10^5$ : 0.38→0.41;  $\Delta H$ : 1.5→1.3 Э.

Для МПлК на основе Ni, с увеличением толщины ферромагнитного слоя с 5 до 100 нм обнаружено уменьшение величины  $\Delta H$  с 4.3 до 3.3 Э и рост  $\max(SNR_{AC}) \cdot 10^5$  с 1.20 до 1.79. Это связано с увеличением (ii) вклада: в сравнении с Fe и  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ , Ni обладает наименьшим коэффициентом экстинкции, что положительно сказывается на интенсивности отраженного света, длине свободного пробега ППП и сопровождается более эффективным взаимодействием локализованного света с ферромагнитным слоем. Также установлено, что рост  $\max(SNR_{AC})$  при изменении толщины железа Ag/Fe(20→5 нм)/ $\text{Si}_3\text{N}_4$ , также связан с влиянием (ii) вклада. При толщине железа 5 нм, ППП, возбуждаемый на границе раздела Fe/ $\text{Si}_3\text{N}_4$ , достигает слоя благородного металла, что увеличивает длину его свободного пробега и позволяет локализованному свету более эффективно взаимодействовать с ферромагнитным слоем.

6. Разработана методика измерения напряженности постоянного магнитного поля при помощи чувствительного элемента в виде МПлК. Данная методика позволяет переводить изменение напряженности внешнего магнитного поля вдоль фиксированного в эксперименте направления, в изменение интенсивности света, отраженного от поверхности МПлК. МПлК, с использованием которого была достигнута максимальная чувствительность, состоял из полимерной дифракционной решетки с периодом 320 нм и высотой дорожек 20 нм, покрытой 100 нм серебра, 100 нм

железа и 20 нм нитрида кремния. Для него экспериментально установлены: максимальное значение экваториального магнитооптического эффекта Керра,  $\delta=4.64\%$ ; величина необходимого модулирующего поля,  $H_{mod}=14.35$  Э; ширина диапазона напряженностей магнитных полей, в которых работает датчик,  $\Delta H=0.6$  Э. Чувствительность датчика составляет  $3.6 \cdot 10^{-6}$  Э на области измерений  $1 \text{ мм}^2$  с теоретическим пределом в  $10^{-7}$  Э на области  $5 \text{ мкм}^2$ .

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, соответствующих требованиям п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В.Ломоносова:

- A1. **Belyaev V.K.**, Murzin D., Martinez-Garcia J.C., Rivas M., Andreev N.V., Kozlov A.G., Samardak A.Yu., Ognev A.V., A.S., Rodionova, V., *FORC-Diagram Analysis for a Step-like Magnetization Reversal in Nanopatterned Stripe Array* // Materials – 2021. – Vol. 14, no. 24. P. 7523, <https://doi.org/10.3390/ma14247523>, IF 3.623
- A2. **Belyaev V.K.**, Rodionova, V.V., Grunin A.A., Inoue M., Fedyanin A.A. *Magnetic field sensor based on magnetoplasmonic crystal* // Sci. Rep. – 2020. – Vol. 10, no 1. P. 7133, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63535-1>, IF3.998
- A3. **Belyaev V.K.**, Murzin D.V., Kozlov A.G., Grunin A.A., Samardak A.S., Ognev A.V., Fedyanin A.A., Inoue M., Rodionova V.V., *Engineering of magnetic, optical and magneto-optical properties of nickel-based one-dimensional magnetoplasmonic crystals* // Jpn. J. Appl. Phys. – 2020. – Vol. 59, P. SEEA08, <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab71df>, IF 1.376
- A4. Murzin D.V., **Belyaev V.K.**, Gross F., Grafe J., Rivas M., Rodionova V.V., *Tuning the magnetic properties of permalloy-based magnetoplasmonic crystals for sensor applications* // Jpn. J. Appl. Phys. – 2020. – Vol. 59, P. SEEA04, <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab5e6a>, IF 1.376

- A5. Murzin D., Mapps D.J., Levada K., **Belyaev V.**, Omelyanchik A., Panina L., Rodionova V. *Ultrasensitive magnetic field sensors for biomedical applications* // *Sensors* – 2020. – Vol. 20, P. 1569, <https://doi.org/10.3390/s20061569>, IF 3.510
- A6. **Belyaev V.K.**, Murzin D.V., Perova N.N., Grunin A.A., Fedyanin A.A., Rodionova V.V. *Permalloy-based magnetoplasmonic crystals for sensor applications* // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2019. – Vol. 482, Pp. 292–295, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.02.032>, IF 2.820
- A7. **Belyaev V.K.**, Kozlov A.G., Ognev A.V., Samardak A.S., Rodionova V.V., *Magnetic properties and geometry driven magnetic anisotropy of magnetoplasmonic crystals* // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2019. – Vol.480, Pp. 150–153, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.02.032>, IF 2.820
- A8. **Belyaev V.K.**, Grunin, A.A., Fedyanin, A.A., Rodionova V.V., *Magnetic and magneto-optical properties of magnetoplasmonic crystals* // *Solid State Phenom* – 2015. – Vol. 234, Pp. 599–602, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.233-234.599>, IF 0.66
- A9. **Belyaev V.**, Grunin A., Chichay K., Shevyrталov S., Fedyanin A., Rodionova V., *Magnetic properties of magnetoplasmonic crystals based on commercial digital discs* // *Acta. Phys. Pol. A.* – 2015. – Vol. 127, no. 2, Pp. 546–548, <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.546>, IF 0.525

#### ИНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ:

- П1. Датчик постоянного магнитного поля на основе магнитоплазмонного кристалла // **Беляев В.К.**, Родионова В.В., Фролов А.Ю., Грунин А.А., Федянин А.А., Патент RU 2725650 С1, МПК G 01 R 33/032. – № 2020106094; Заяв. 10.02.2020; Опубл. 03.07.2020
- T1. DC magnetic field mapping using magnetoplasmonic crystal / **Belyaev V.**, Murzin, D., Grunin, A., Fedyanin, A., Rodionova, V. // *Book of Abstracts Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.* – 2020. – P. 1146220.
- T2. Magnetic field mapping with magnetoplasmonic crystal – based sensor / **Belyaev V.**, Murzin D., Grunin A., Fedyanin A.,

Rodionova V., // Book of Abstracts of the IV International Baltic Conference on Magnetism. – 2021. – P. 94.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M., Kotov V.A., et al. // Nat. Nanotechnol. 2011. Vol. 6. Pp. 370–376.
2. Zayats A.V., Smolyaninov I.I. // J. Opt. A. Pure. Appl. Op. 2003. Vol. 5, no. 4. Pp. S16–S50.
3. Halagacka L., Vanwolleghe M., Postava K., Dagens B., et al. // Opt. Express. 2013. Vol. 21, no. 19. Pp. 21741–21755.
4. Grunin A.A., Mukha I.R., Chetvertukhin A.V., Fedyanin A.A. // J. Magn. Magn. Mater. 2016. Vol. 415. Pp. 72–76.
5. Knyazev G.A., Kapralov P.O., Gusev N.A., Kalish A.N., et al. // ACS Photonics. 2018. Vol. 5, no. 12. Pp. 4951–4959.
6. Cichelero R., Kataja M., Campoy-Quiles M., Herranz G. // Opt. Express. 2018. Vol. 26, no. 26. Pp. 34842–34852