

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Мурзин Дмитрий Валерьевич

**Резонансный экваториальный эффект Керра в
магнитоплазменных кристаллах на основе пермаллоя**

Специальность 1.3.12. Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена в Образовательно-научном кластере «Институт
высоких технологий» Балтийского Федерального Университета имени
Иммануила Канта

Научный руководитель – **Беляев Виктор Константинович** –
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты – **Барышев Александр Валерьевич** – доктор
физико-математических наук, профессор,
Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики имени Н.Л. Духова,
начальник оптической лаборатории

Юрасов Алексей Николаевич – доктор
физико-математических наук, профессор,
МИРЭА – Российский технологический
университет, Институт перспективных
технологий и индустриального
программирования, кафедра
нанозлектроники, профессор

Долгова Татьяна Викторовна – кандидат
физико-математических наук, МГУ имени
М.В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра квантовой электроники, старший
научный сотрудник

Защита диссертации состоится «**19**» декабря **2024 г. в 18 часов 00 минут**
на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские
горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru:

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на
портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3198/>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию усиления экваториального эффекта Керра (ЭЭК) в одномерных и двумерных магнитоплазмонных кристаллах (МПлК), наблюдаемого при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). В рамках работы рассматривается влияние морфологии и толщины ферромагнитного слоя магнитоплазмонных кристаллов на их оптические и магнитные свойства, а также на полевые зависимости ЭЭК.

Актуальность работы обусловлена интересом к применению МПлК [1, 2] в устройствах для обнаружения изменений в химическом составе или физических характеристиках среды. Например, одним из актуальных направлений является применение МПлК в качестве чувствительных элементов датчиков магнитного поля [3, 4], подходящих для измерения и визуализации локальных магнитных полей в областях магнитной дефектоскопии, биомедицины и характеристики микромагнитных систем. Ключевыми факторами, определяющими эффективность МПлК в данном направлении, являются магнитные свойства, максимально достижимая величина магнитооптического эффекта, эффективность возбуждения и затухания ППП, а также величина оптических потерь в материале. Среди МПлК на основе ферромагнитных металлов активно исследуются образцы на основе железа и никеля [5, 6]. Первые демонстрируют наибольшие значения магнитооптических эффектов, а вторые обладают низкими оптическими потерями. Однако тесная взаимосвязь между оптическими, магнитными, плазмонными и магнитооптическими свойствами МПлК требует оптимизации всех свойств для конкретных прикладных областей путём подбора морфологии и состава подобных структур. С этой точки зрения, одним из интересных материалов для изготовления МПлК является пермаллой – сплав железа и никеля $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Его применение предоставляет широкие возможности по изготовлению МПлК с требуемой анизотропией магнитных свойств, а также со сбалансированными оптическими и магнитооптическими свойствами. Таким образом, оптимизация магнитных,

оптических и магнитооптических свойств МПЛК на основе пермаллоя для достижения требуемой величины усиленного ЭЭК путем изменения их состава и морфологии является актуальной научной задачей.

Цель работы. Экспериментальное исследование магнитных и оптических свойств, а также усиленного экваториального эффекта Керра в магнитоплазмонных кристаллах на основе одномерных дифракционных решеток с различной морфологией и двумерных квадратно упорядоченных дифракционных решёток с различным фактором заполнения.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Изготовление, а также характеристика состава и морфологии, одномерных магнитоплазмонных кристаллов на основе полимерных дифракционных решеток с различной морфологией, периодом и высотой профиля, и двумерных магнитоплазмонных кристаллов с квадратно упорядоченной решеткой, с последовательностью слоев $\text{Ag}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Si}_3\text{N}_4$.
2. Исследование магнитных свойств магнитоплазмонных кристаллов при ориентации магнитного поля в плоскости образцов. Определение основных механизмов перемагничивания магнитоплазмонных кристаллов.
3. Исследование спектральных зависимостей отражательной способности и магнитооптического экваториального эффекта Керра магнитоплазмонных кристаллов в видимом и ближнем-инфракрасном диапазоне длин волн. Установление влияния параметров магнитоплазмонных кристаллов на эффективность усиления экваториального эффекта Керра в диапазоне длин волн, соответствующем возбуждению поверхностных плазмон-поляритонов.
4. Сборка и автоматизация установки для исследования полевых зависимостей экваториального эффекта Керра одномерных и двумерных магнитоплазмонных кристаллов в переменном магнитном поле с убывающей амплитудой.
5. Определение морфологических параметров двумерных магнитоплазмонных кристаллов, позволяющих реализовать идентичные спектральные и полевые зависимости экваториального эффекта Керра при перемагничивании образцов вдоль направлений двух векторов обратной решетки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Резонансно усиленный за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов экваториальный эффект Керра в одномерных магнитоплазмонных кристаллах состава $\text{Ag}(50 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(5 - 20 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(20 \text{ нм})$ с периодом 320 нм немонотонно зависит от толщины ферромагнитного слоя с экстремумом при толщине 10 нм.
2. При увеличении высоты профиля с 28 нм до 88 нм в одномерных магнитоплазмонных кристаллах состава $\text{Ag}(150 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(150 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(20 \text{ нм})$ с периодом 500 нм экваториальный эффект Керра линейно возрастает в 2.4 раза, что сопровождается 8-кратным уменьшением коэффициента отражения.
3. В двумерных магнитоплазмонных кристаллах состава $\text{Ag}(150 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(150 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(20 \text{ нм})$ с квадратно упорядоченной решеткой величина резонансно усиленного за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов экваториального эффекта Керра находится в немонотонной зависимости от фактора заполнения решетки с экстремумом при факторе заполнения 0.81.
4. Разработанный алгоритм подбора фактора заполнения двумерных магнитоплазмонных кристаллов состава $\text{Ag}(150 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(150 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(20 \text{ нм})$ с квадратно упорядоченной решеткой позволяет реализовать идентичные спектральные и полевые зависимости экваториального эффекта Керра при перемагничивании образцов вдоль направлений двух векторов обратной решетки, что необходимо для двухосевых сенсорных элементов.

Научная новизна работы. Впервые были проанализированы магнитные, оптические и магнитооптические свойства одномерных и двумерных МПлК на основе пермаллоя с различной морфологией, толщиной ферромагнитного слоя и количеством осей решетки.

Установлено влияние морфологии одномерных МПлК на процесс их перемагничивания вдоль трудной и лёгкой осей намагничивания. Увеличение периода и высоты профиля одномерных МПлК не влияет на основной механизм перемагничивания вдоль лёгкой оси намагничивания, в то время как

перемагничивание вдоль трудной оси намагничивания обусловлено дипольным взаимодействием между различными областями профиля решётки, уменьшающимся при уменьшении высоты профиля и периода магнитоплазмонного кристалла. Оптимизация морфологии и толщины ферромагнитного слоя одномерных МПлК позволила достичь чувствительности к внешнему магнитному полю в 8 %/Э при детектировании резонансно усиленного ЭЭК на длине волны, соответствующей возбуждению поверхностного плазмонного резонанса.

Была разработана методика создания двумерных МПлК с квадратно упорядоченной решёткой, состоящей из массива полимерных колонн, покрытых тонкоплёночной структурой из серебра, пермаллоя и нитрида кремния. Обнаружена немонотонная зависимость ЭЭК для двумерных МПлК с квадратной решёткой от их фактора заполнения (FF). Экспериментально была подтверждена возможность модуляции интенсивности отражённого линейно поляризованного света до 0.89 % при воздействии переменного магнитного поля, напряженность которого превышает поле насыщения образцов.

Изучены магнитные свойства двумерных МПлК при их перемагничивании в плоскости вдоль направлений векторов обратной решётки. Показано, что увеличение FF выше критического значения приводит к появлению анизотропии магнитных свойств при перемагничивании образцов вдоль направлений векторов обратной решётки. Определён диапазон FF , обеспечивающих симметричные петли гистерезиса и полевые зависимости ЭЭК при перемагничивании образцов вдоль указанных векторов. Установлено, что изменение механизма перемагничивания МПлК путём перехода от одномерной решетки к двумерной позволяет значительно расширить диапазон измеряемых магнитных полей для датчиков магнитного поля на их основе.

Достоверность результатов. Достоверность полученных данных обусловлена использованием современного научного оборудования для создания и анализа наноструктур, а также исследования их магнитных, оптических и магнитооптических свойств. Все использованные приборы предварительно

прошли процедуру калибровки. Итоги экспериментов были представлены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях, и соответствуют результатам других научных коллективов.

Практическая значимость работы. Полученные результаты исследования магнитных, оптических и магнитооптических свойств одномерных и двумерных МПлК на основе пермаллоя с различной морфологией, толщиной ферромагнитного слоя и числом осей решетки способствуют развитию и оптимизации чувствительных датчиков магнитного поля на основе МПлК. Экспериментально продемонстрирована возможность уменьшения напряжённости модулирующего магнитного поля, необходимого для функционирования сенсорных элементов на основе одномерных МПлК в геометрии ЭЭК, по сравнению с образцами на основе никеля и железа с аналогичной толщиной ферромагнитного слоя. Разработанная методика создания двумерных МПлК с квадратно упорядоченной решёткой, состоящей из массива полимерных колонн, покрытых тонкоплёночной структурой из серебра, пермаллоя и нитрида кремния, позволяет создавать образцы с идентичными магнитными и магнитооптическими свойствами вдоль направлений векторов обратной решётки. Это открывает новые перспективы для использования МПлК в качестве двухосевых чувствительных элементов магнитного поля, обладающих практически идентичными чувствительностью и рабочим диапазоном полей в обоих направлениях, что сложно реализовать в хорошо изученных одномерных аналогах.

Апробация работы и публикации. Результаты работ были представлены лично автором в виде устных и стендовых докладов на международных и всероссийских конференциях, таких как Международная конференция «Ломоносов-2019», Magnetism and Optics Research International Symposium 19, III International Baltic Conference on Magnetism 2019, Международная конференция «Ломоносов-2020», Joint European Magnetic Symposia 2020, IV International Baltic Conference on Magnetism 2021, VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism», Всероссийская научная конференция Енисейская фотоника 2022,

Международная конференция «Ломоносов-2022, Smart Composites International School 2022, Samarkand International Symposium on Magnetism 2023, V International Baltic Conference on Magnetism 2023, The European School on Magnetism 2023. Исследования по теме диссертации были поддержаны из средств субсидии, выделенной на реализацию Программы повышения конкурентоспособности ФГАОУ ВО БФУ им. И. Канта, гранта РФФИ №22-22-00997, гранта Минобрнауки России №13.2251.21.0143 и из средств программы развития НОМЦ «Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской».

По результатам диссертации опубликовано 6 печатных работ в рецензируемых журналах, индексируемых по базам данных Scopus и WoS.

Личный вклад автора. Постановка цели и задач исследования, а также построение плана проведения экспериментальных работ, были выполнены автором совместно с научным руководителем Беляевым В.К. Экспериментальные исследования морфологических, магнитных, оптических и магнитооптических свойств, а также элементный анализ образцов, были проведены лично автором работы, либо при непосредственном участии или руководстве автора работы в проведении эксперимента. Пять статей написано преимущественно автором работы, и в одной вклад автора является существенным. Обработка и анализ данных, полученных в ходе экспериментальных исследований и в результате численного моделирования, выполнены автором работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, которые занимают 130 страниц. В тексте содержится 51 рисунок и 11 таблиц. Библиографический список включает 192 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение дает представление об актуальности, целях, задачах, новизне темы диссертационной работы и о практической значимости проведенного исследования. В нем приведены положения, выносимые на защиту, сформулированы подходы к получению достоверных данных, даны сведения об апробации работы и о публикациях, в которых изложены основные результаты

диссертационной работы, а также приведена информация о личном вкладе автора в проведенное исследование.

В первой главе приведен литературный обзор, в рамках которого рассматриваются виды магнитооптических эффектов и возможность их модификации в МПлК. В частности, рассматриваются оптические свойства и усиление ЭЭК в одномерных и двумерных МПлК на основе ферромагнитных металлов. В завершение обзора, обсуждается влияние морфологии МПлК на их магнитные свойства, которые, в частности, определяют возможности и ограничения датчиков магнитного поля на основе МПлК.

Во второй главе дано описание методик изготовления одномерных и двумерных МПлК, а также методов характеризации их морфологических, оптических, магнитных и магнитооптических свойств. В главе приведены названия использованного экспериментального оборудования и протоколы исследования свойств МПлК. Создание МПлК проходило в два этапа – изготовление подложек, содержащих одномерные или двумерные полимерные дифракционные решетки, и последующее напыление на поверхность подготовленных подложек функциональных слоев $\text{Ag}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Si}_3\text{N}_4$. Всего в ходе работ было изучено два типа одномерных МПлК с разной формой и высотой профиля, а также периодом решетки, и один тип двумерных МПлК с квадратно упорядоченной решеткой и различным FF . Полимерные подложки для создания одномерных МПлК с квази-синусоидальным и трапецеидальным профилем были изготовлены из коммерческих BD и DVD дисков. Заявленные период / высота профиля подложек на основе BD и DVD дисков составляют 320 нм / 20 нм и 740 нм / 100 нм, соответственно. Далее в работе данные подложки обозначены как $Sub_{1.1}$ и $Sub_{1.2}$. Для изготовления контрольных образцов были использованы гладкие подложки из кремниевых пластин Si (400), которые в работе обозначены как $Ref. Sub_1$. Дифракционные решетки для изготовления одномерных МПлК с прямоугольным профилем были подготовлены с использованием метода электронно-лучевой литографии. В качестве подложки использовалась гладкая пластина Si (100). Всего в рамках серии было изготовлено 4 дифракционные

решетки с периодом 500 нм и шириной отдельных дорожек 250 нм, изготовление которых происходило путем экспонирования областей подложки электронным пучком с дозами равными 400 – 1000 мкКл/см² с шагом 200 мкКл/см², что позволило изготовить дифракционные решетки с различной высотой профиля. Далее в работе данные подложки обозначены как *Sub*₂. В качестве контрольного образца выступила область подложки из Si (100), не подверженная действию электронного пучка в процессе литографии. Двумерные квадратно упорядоченные дифракционные решетки для изготовления МПлК с разным *FF* были созданы с использованием метода электронно-лучевой литографии. В качестве подложек выступали стеклоуглеродные пластины Sigradur G. Изготовление образцов с фиксированным периодом 610 нм вдоль направлений двух векторов обратной решетки G_x и G_y и различным *FF* происходило путем изменения дозы экспонирования в диапазоне 200 – 600 мкКл/см² с шагом 50 мкКл/см². Далее в работе данные подложки обозначены как *Sub*₃. В качестве контрольного образца выступила область подложки из Sigradur G, не подверженная действию электронного пучка в процессе литографии. Создание функциональных слоёв Ag/Ni₈₀Fe₂₀/Si₃N₄ на поверхности подложек осуществлялось с использованием метода магнетронного распыления. Всего в работе рассмотрено три серии МПлК: № 1 на основе подложек *Sub*_{1.1} и *Sub*_{1.2} с последовательностью слоев Ag(50 нм)/Ni₈₀Fe₂₀(5 – 20 нм)/Si₃N₄(10 нм); № 2 на основе подложек *Sub*₂ с последовательностью слоев Ag(50 нм)/Ni₈₀Fe₂₀(150 нм)/Si₃N₄(20 нм); № 3 на основе подложек *Sub*₃ с последовательностью слоев Ag(100 нм)/Ni₈₀Fe₂₀(70 нм)/Si₃N₄(15 нм). Характеризация морфологии МПлК выполнена методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Соотношение железа и никеля в ферромагнитном слое МПлК было определено методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Магнитные свойства МПлК исследовались при помощи методов вибрационной и Керр-магнитометрии. В качестве дополнительного метода исследования магнитных свойств МПлК второй серии была использована магнитная силовая микроскопия (МСМ). В главе

представлено описание установок для исследования спектральных зависимостей отражательной способности (R) и величины ЭЭК (δ), а также дано описание параметров, использованных для численного моделирования соответствующих спектров для 1-й серии МПлК. Собранные и автоматизированные автором работы установки также были использованы для исследования полевых зависимостей δ .

Третья глава посвящена результатам исследования морфологических, оптических, магнитных и магнитооптических свойств изготовленных одномерных и двумерных МПлК. Данная глава разделена на три раздела, посвященных каждой из изготовленных серий МПлК.

В первом разделе главы представлены результаты исследования свойств первой серии МПлК на основе подложек $Sub_{1.1}$ и $Sub_{1.2}$. Метод АСМ подтвердил, что средние значения высоты дорожек и периода МПлК соответствуют заявленным параметрам подложек. Изображения поверхности образцов на основе гладких подложек $Ref. Sub_1$ показали, что шероховатость формируемой тонкопленочной структуры во всех циклах магнетронного распыления не превышала 2 нм. Метод ЭДС показал, что содержание железа и никеля в образцах отклоняется от заявленных значений не более чем на 4 %. Продемонстрировано, что перемагничивание контрольных образцов и МПлК вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) происходит путем движения доменной стенки и её закрепления на дефектах структуры. Коэрцитивная сила (H_c) определяется степенью дефектности структуры и кратно возрастает с увеличением высоты профиля и периода МПлК, что подтверждается двумя методами измерения. Также в главе продемонстрированы результаты оценки влияния поверхностных и объемных дипольных вкладов на перемагничивание МПлК вдоль оси трудного намагничивания (ОТН). На основе полученных данных сделан вывод преобладания объемного вклада над поверхностным в МПлК на основе подложек $Sub_{1.1}$ и противоположном результате для МПлК на основе подложек $Sub_{1.2}$.

Соблюдение условий согласования волновых векторов падающего электромагнитного излучения и ППП на поверхности МПлК при угле падения света 68° приводит к возникновению характерных аномалий Рэлея-Вуда в

спектрах R двух видов МПлК. При этом, резонансы в спектрах R МПлК на основе подложек $Sub_{1,1}$ характеризуются минимальной амплитудой аномалии Рэлея, в то время как в спектрах МПлК на основе подложек $Sub_{1,2}$ данный тип аномалии выражен более отчетливо, что говорит о росте нерезонансного вклада в формирование оптических и магнитооптических свойств МПлК с увеличением высоты профиля структуры. В исследованных МПлК на основе подложек $Sub_{1,1}$ минимум R ($R_{мин}$) и максимальное экспериментально полученное значение δ ($\delta_{макс}$) имеет немонотонную зависимость от толщины слоя пермаллоя и достигает максимума в 1.24 % при толщине ферромагнитного слоя 10 нм. В сравнении с контрольными образцами, МПлК с толщиной слоя пермаллоя в 5, 10, 15 и 20 нм продемонстрировали 3.8-, 3.5-, 3.8- и 4.9-кратное увеличение δ , соответственно. Для МПлК на основе подложек $Sub_{1,2}$ наблюдается противоположная ситуация и рост толщины ферромагнитного слоя сопровождается монотонным ростом δ .

Для двух типов МПлК проведены измерения полевых зависимостей δ на резонансной длине волны, при которой величина δ составляет $\delta_{макс}$. Пример экспериментально полученных полевых зависимостей для МПлК 1-ой серии на основе подложек $Sub_{1,1}$ показаны на Рис. 2.

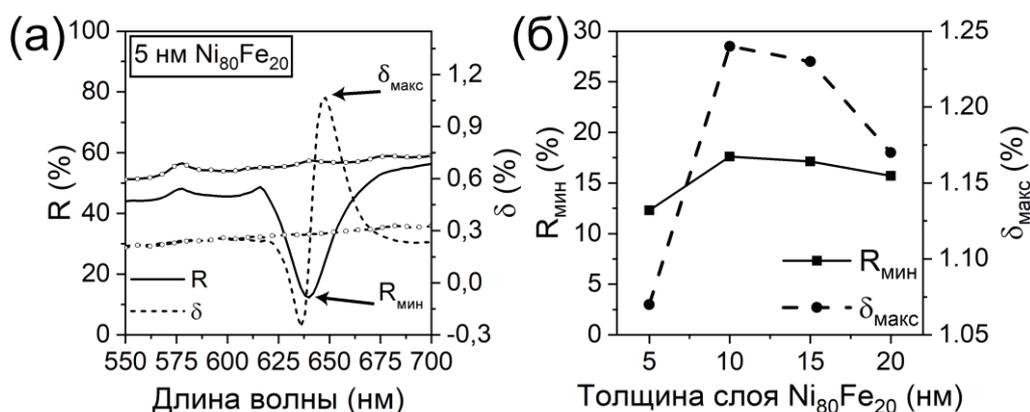


Рис. 1. Из [A2, A5]. (а) Спектры R и δ МПлК на основе подложки $Sub_{1,1}$ (линии без символов), а также контрольного образца на основе подложки $Ref. Sub_1$ (линии с круглыми точками), с толщиной слоя пермаллоя 5 нм. (б) Зависимости $R_{мин}$ и $\delta_{макс}$ от толщины слоя пермаллоя для МПлК на основе подложек $Sub_{1,1}$.

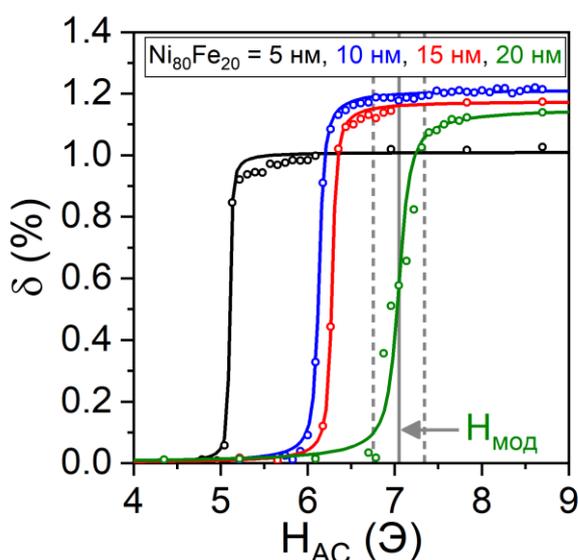


Рис. 2. Из [A2, A5]. Полевые зависимости δ для МПлК на основе подложек $Sub_{1.1}$ с различной толщиной слоя пермаллоя. Сплошными линиями обозначены результаты аппроксимации экспериментальных точек модифицированной функцией Ланжевена, а кругами без линий – экспериментально полученные данные. H_{mod} – величина H_{AC} , соответствующая максимуму чувствительности МПлК к внешнему магнитному полю $\partial(\delta)/\partial(H_{AC})$.

Амплитуда полевых зависимостей δ определяется как магнитными, так и плазмонными свойствами МПлК, а их форма и значение H_{AC} , соответствующие величине оптимального модулирующего магнитного поля (H_{mod}), определяются исключительно магнитными свойствами МПлК. В частности, полученные полевые зависимости δ в постепенно убывающем переменном магнитном поле представляют собой основные кривые намагничивания МПлК, что обусловлено использованной методикой измерения. Полученные результаты подтверждают, что, начиная с состояния с малой остаточной намагниченностью, для достижения магнитного насыщения МПлК на основе обоих типов подложек требуется приложить поле, близкое к значению H_c . Это подтверждает ранее сделанные выводы о том, что основным механизмом перемагничивания, определяющим H_c МПлК, является зарождение и закрепление доменных стенок на дефектах их структуры. Кроме того, в работе продемонстрировано, что наибольшая чувствительность при применении МПлК в качестве чувствительных элементов датчиков магнитного поля в геометрии ЭЭК достигается не для МПлК с максимальной величиной δ , а для образцов с наибольшим наклоном полевой зависимости δ , которая определяется дифференциальной магнитной восприимчивостью МПлК. Исходя из соображений о влиянии наклона полевых зависимостей δ на чувствительность МПлК, рост чувствительности образцов

приводит к уменьшению диапазона измеряемых магнитных полей (ΔH). Таким образом, изменение состава и структуры ферромагнитного слоя МПлК может быть использовано для оптимизации чувствительности и ΔH чувствительных элементов датчиков на их основе с единственным ограничением – рост одного из параметров будет сопровождаться уменьшением второго.

Во втором разделе главы представлены результаты исследования свойств второй серии МПлК на основе подложек *Sub2*. Метод АСМ подтвердил, что использование доз экспонирования 400, 600, 800 и 1000 мкКл/см² для формирования подложек МПлК позволило изготовить образцы с высотой профиля 28 нм, 43 нм, 67 нм и 88 нм, соответственно. В то время, как период изготовленных МПлК близок к заявленному значению, экспериментально измеренная ширина дорожек образцов, а также расстояние между ними, примерно на 30 нм отличается от заявленного значения. Данное расхождение связано как с гауссовым распределением энергии электронного пучка, так и с небольшой величиной использованных доз экспонирования, обуславливающих отклонение профиля от прямоугольного. Шероховатость поверхности, оценка которой проводилась по АСМ изображениям поверхности контрольной области, составила 1.1 ± 0.2 нм. Метод ЭДС показал, что содержание железа и никеля в образцах отклоняется от заявленных значений не более чем на 1 %.

В сравнении с контрольными образцами для МПлК 1-й серии, петля гистерезиса контрольной области МПлК 2-й серии с толщиной слоя пермаллоя 150 нм демонстрирует $H_c = 50.2$ Э и поле насыщения (H_s) = 550 Э. Данный рост значений H_c и H_s , в частности, наблюдается в поликристаллических пленках пермаллоя с отрицательной магнитострикцией, толщина которых превышает определенное критическое значение. При достижении этой толщины в ферромагнитной пленке формируется полосчатая доменная структура. Примечательно, что форма петель гистерезиса в плоскости таких пленок остается неизменной, независимо от направления приложенного внешнего магнитного поля. Данный результат наблюдается для экспериментально полученных петель гистерезиса для контрольной области и образцов второй серии МПлК с различной

высотой профиля при приложении поля вдоль и поперек дорожек. Такое поведение может быть связано с увеличением шероховатости или другими особенностями морфологии поверхности подложек, на которых происходит рост функциональных слоев МПЛК.

Экспериментальное исследование оптических и магнитооптических свойств данной серии образцов проводилось при угле падения света 45° , при котором в спектрах R и δ МПЛК наблюдаются резонансы, связанные с возбуждением ППП. Пример спектров R и δ МПЛК с высотой профиля 88 нм и зависимость R_{\min} и δ_{\max} от высоты профиля МПЛК соответствующей серии показаны на Рис. 3. Обнаружено, что в спектрах R МПЛК с высотой профиля 28 нм и 43 нм наблюдается практически лоренцева форма резонанса, что говорит о преобладании резонансного вклада в формирование оптических свойств данных МПЛК. При росте высоте профиля до 67 нм и 88 нм, вблизи аномалий Вуда в спектрах R возникают аномалии Рэля, спектральное положение которых составляет 845 нм, что близко к аналитически рассчитанному значению 853 нм.

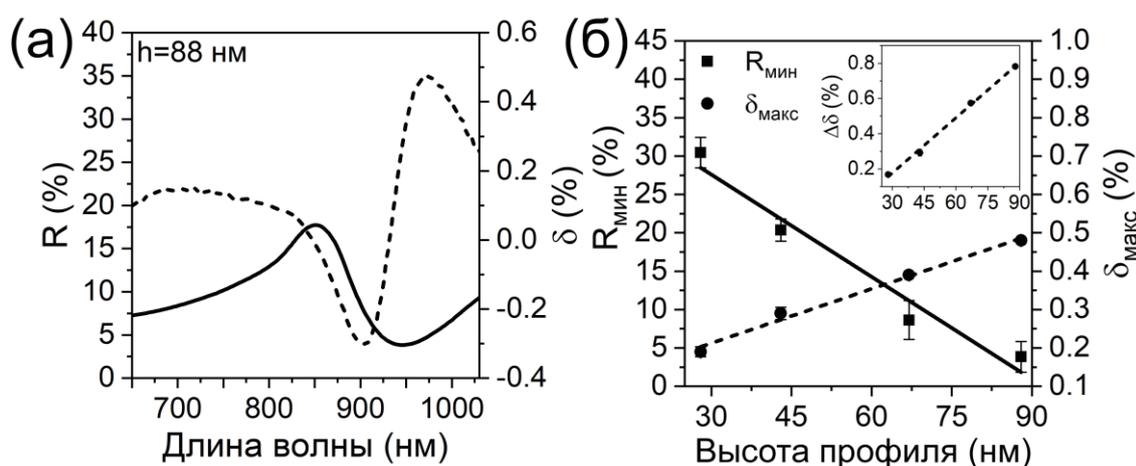


Рис. 3. Из [A1]. (а) Спектры R и δ МПЛК на основе подложки Sub_2 с высотой профиля 88 нм. (б) Зависимости R_{\min} и δ_{\max} от высоты профиля. На вставке изображена зависимость $\Delta\delta$ от высоты профиля. Точками отмечены экспериментально полученные значения, а линиями обозначены результаты аппроксимации точек линейными функциями.

Кроме того, рост высоты профиля сопровождается смещением аномалии Вуда в область больших длин волн и восьмикратным уменьшением R_{min} с 30.5% до 3.8%. Рост высоты профиля исследованных МПлК также привел к линейному увеличению δ с 0.19 % при высоте профиля 28 нм до 0.48 % при высоте профиля 88 нм. Показано, что в сравнении с контрольной областью, МПлК с высотой профиля 28, 43, 67 и 88 нм продемонстрировали 4.9-, 10.7-, 28.5- и 44.5-кратное увеличение ЭЭК в диапазоне длин волн, соответствующем возбуждению ППП, соответственно.

В третьем разделе главы представлены результаты исследования свойств третьей серии двумерных МПлК на основе подложек *Sub3*. Изображения поверхности, полученные методами АСМ и СЭМ показали, что узлы МПлК, изготовленных при указанных дозах экспонирования, имеют произвольную трапециевидную форму со скругленными вершинами. Показано, что FF МПлК, а также ширина колонн в узлах МПлК и степень их скругления, может управляться путем подбора дозы экспонирования при изготовлении дифракционных решеток методом электронно-лучевой литографии. Показано, что величина FF нелинейно зависит от дозы экспонирования, а степень скругления линейно возрастает с увеличением дозы экспонирования. Метод ЭДС показал, что содержание железа и никеля в экспериментальных образцах МПлК отклоняется от заявленных значений не более чем на 2 %.

Согласно результатам исследования магнитных свойств МПлК вдоль направлений векторов обратной решетки, их FF оказывает значительное влияние как на форму петель гистерезиса, так и на величину H_c вдоль двух направлений. В частности, вплоть до $FF = 0.81$, петли гистерезиса МПлК вдоль двух направлений совпадают как по форме, так и по значению H_c , а их наклон преимущественно связан с дипольным взаимодействием между колоннами в узлах МПлК. Дальнейшее уменьшение FF сопровождается возникновением дополнительного скачкообразного переключения намагниченности, а петли гистерезиса вдоль двух направлений отличаются по форме и по величине H_c . Таким образом, наиболее оптимальные магнитные свойства исследуемых

двумерных МПлК для сенсорных приложений, заключающиеся в идентичности петель гистерезиса вдоль направлений двух векторов обратной решетки, достигаются при FF в диапазоне от 0.99 до 0.81. Примеры петель гистерезиса МПлК с $FF = 0.81$ и 0.62, а также зависимость H_c МПлК от FF , показаны на Рис. 4.

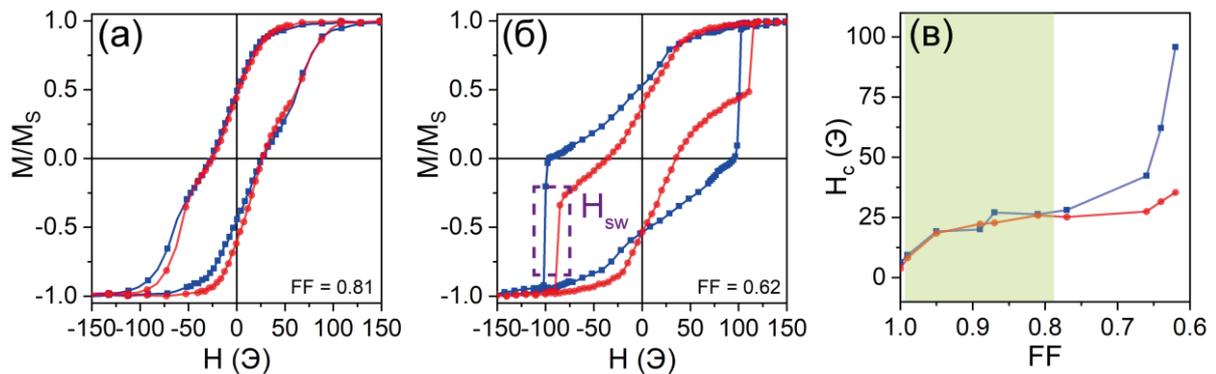


Рис. 4. Из [А6]. (а, б) Петли гистерезиса МПлК на основе подложек Sub_3 с различным FF измеренные вдоль G_x (синие) и G_y (красные). (в) Зависимости H_c от FF МПлК, измеренные вдоль G_x и G_y . Значение при $FF = 1$ соответствует результатам для контрольной области. Зелёным цветом выделен диапазон FF , при которых МПлК обладают схожими H_c вдоль G_x и G_y , а в петлях гистерезиса не наблюдается скачкообразного переключения намагниченности (H_{sw}).

В спектрах R двумерных МПлК в окрестности длины волны 608 нм наблюдаются аномалии Вуда, ширина которых превосходит аналогичные аномалии, наблюдаемые в спектрах для МПлК 1-ой и 2-ой серий. Спектральное положение наблюдаемых аномалий согласуется с результатами расчетов, а их возникновение является результатом возбуждения коллинеарной $(-2, 0)$ и неколлинеарной $(-1, \pm 1)$ мод ППП на длинах волн 602 нм и 638 нм, соответственно. Одновременное возбуждение двух мод приводит к уширению наблюдаемого резонанса в спектрах R МПлК. Показано, что ширина наблюдаемого резонанса немонотонно зависит от FF и в исследуемом диапазоне FF достигает минимумов в 44.6 нм и 60.8 нм при $FF = 0.99$ и $FF = 0.62$, соответственно, и максимального значения в 119.5 нм при $FF = 0.87$ и $FF = 0.81$.

Как и в случае с ранее рассмотренными образцами, в спектрах δ двумерных МПлК наблюдается ассиметричный резонанс Фано в окрестности длины волны

640 нм. Показано, что δ исследуемых МПлК находится в немонотонной зависимости от их FF с экстремумом при $FF = 0.81$. При этом, представленная методика изготовления двумерных МПлК позволяет подобрать FF образцов для достижения идентичных спектральных и полевых зависимостей δ при перематничивании образцов вдоль направлений двух векторов обратной решетки, что, в частности, достигается для МПлК с $FF = 0.81$ и необходимо для реализации двухосевых сенсорных элементов датчиков магнитного поля на основе двумерных МПлК в геометрии ЭЭК. Примеры Спектров R и δ , а также полевая зависимость δ , для МПлК с $FF = 0.81$ и зависимость $\delta_{\text{макс}}$ от FF показаны на Рис. 5.

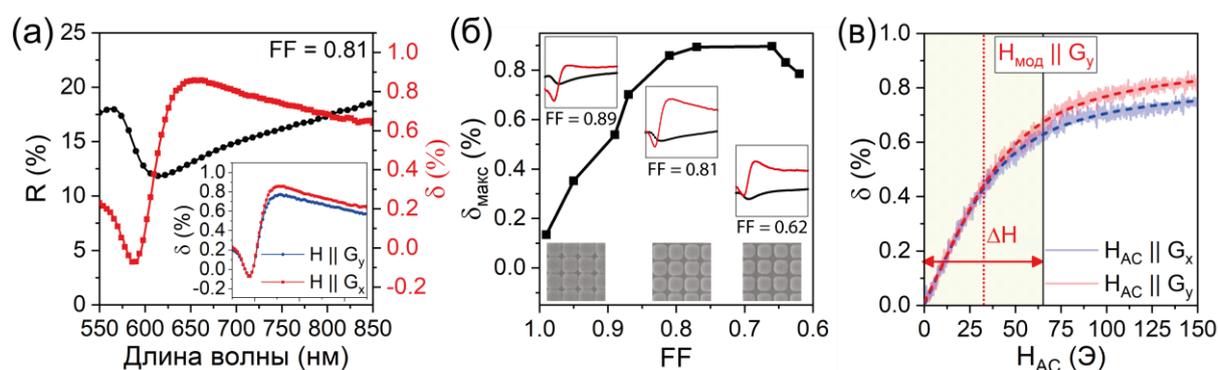


Рис. 5. Из [А6]. (а) Спектры R и δ для МПлК с $FF = 0.81$. Измерения проводились в магнитном поле, направленном вдоль G_y . На вставке панели продемонстрировано сравнение спектров δ , измеренных в магнитном поле, направленном вдоль G_y и G_x . (б) Зависимость $\delta_{\text{макс}}$ от FF . На вставке изображены спектры R и δ , а также соответствующие СЭМ изображения образцов. (в) Полевые зависимости δ для МПлК с $FF = 0.81$, измеренные вдоль G_x и G_y . Штрихованными линиями обозначены результаты аппроксимации экспериментальных точек модифицированной функцией Ланжевена. $H_{\text{мод}}$ (красная пунктирная линия) – величина $H_{\text{АС}}$, соответствующая максимуму $\partial(\delta)/\partial(H_{\text{АС}})$. ΔH – оптимальный диапазон измеряемых магнитных полей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1 Экспериментально продемонстрировано, что основной механизм перемагничивания одномерных МПлК с общим составом $\text{Ag}(50 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(5 - 20 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(10 \text{ нм})$ вдоль ОЛН, период / высота профиля которых составляет 320 нм / 20 нм и 740 нм / 100 нм, не отличается от механизма перемагничивания контрольных образцов на основе гладких подложек того же состава. Перемагничивание заявленных МПлК на основе поликристаллических пленок пермаллоя вдоль ОЛН осуществляется путем зарождения доменов с обратным направлением намагниченности на краевых дефектах МПлК и их необратимого роста в полях, близких к значению H_c образцов, за счет движения доменных границ под действием обратного магнитного поля. H_c контрольных образцов растет с увеличением шероховатости пленки за счет увеличения дефектности магнитного слоя, препятствующей движению доменной стенки при перемагничивании образцов. При перемагничивании вдоль ОЛН отдельные элементы профиля МПлК выступают в качестве дефектов, что позволяет управлять величиной H_c образцов за счет изменения профиля и периода МПлК. Показано, что при намагничивании МПлК с периодом 320 нм и высотой профиля 20 нм вдоль ОТН, магнитные моменты областей МПлК выстраиваются вдоль профиля структуры для минимизации полей рассеяния отдельных дорожек МПлК, в то время как увеличение высоты профиля и периода сопровождается увеличением вклада дипольного взаимодействия между отдельными элементами структуры в перемагничивание МПлК вдоль ОТН. При толщине слоя пермаллоя в диапазоне 10 – 20 нм для МПлК с периодом 740 нм и высотой профиля 100 нм установлено наличие трех H_{sw} при перемагничивании вдоль ОТН.
- 2 Экспериментально исследованы резонансные аномалии в спектрах R и δ МПлК с общим составом $\text{Ag}(50 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(5 - 20 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(10 \text{ нм})$, период / высота профиля которых составляет 320 нм / 20 нм и 740 нм / 100 нм. Показано, что для МПлК в спектрах R наблюдаются резонансы, связанные с возбуждением ППП. Спектральное положение наблюдаемых резонансов согласуется с

результатами расчёта уравнений фазового синхронизма между падающим электромагнитным излучением и ППП на периодической структуре МПлК. Показано, что возбуждение ППП приводит к появлению знакопеременного асимметричного резонанса формы Фано в спектрах δ . Установлено, что в заявленном диапазоне толщин слоя пермаллоя в МПлК с периодом 320 нм и высотой профиля 20 нм амплитуда резонанса R и $\delta_{\text{макс}}$ немонотонно зависит от толщины ферромагнитного слоя с экстремумом при толщине 10 нм. С увеличением периода / высоты профиля МПлК с 320 нм / 20 нм до 740 нм / 100 нм, амплитуда резонанса в спектре R и $\delta_{\text{макс}}$ монотонно возрастает с толщиной слоя пермаллоя. Установлено, что вклад нерезонансных процессов в форму резонансов в спектрах R и δ исследованных МПлК мал по сравнению с вкладом резонансных процессов, что подтверждено сохранением формы резонанса Фано в спектрах δ независимо от морфологических параметров и толщины ферромагнитного слоя.

- 3 Экспериментально исследованы резонансные аномалии в спектрах R и δ одномерных МПлК, имеющих общий состав $\text{Ag}(50 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(150 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(20 \text{ нм})$ и обладающих периодом 500 нм и высотой профиля в диапазоне 28 – 88 нм. Установлено, что при росте высоты профиля с 28 нм до 88 нм амплитуда $\delta_{\text{макс}}$ линейно возрастает с 0.19 % до 0.48 %. Рост высоты профиля также сопровождается увеличением $\Delta\delta$ с 0.17 % до 0.78 %, соответственно. В сравнении с контрольной областью на основе гладкой подложки, одномерные МПлК с высотой профиля 28, 43, 67 и 88 нм продемонстрировали 4.9-, 10.7-, 28.5- и 44.5-кратное увеличение $\Delta\delta$, соответственно.
- 4 Экспериментально исследованы резонансные аномалии в R и δ двумерных магнитоплазмонных кристаллов с квадратно упорядоченной решеткой в условиях одновременного возбуждения коллинеарной и неколлинеарной плазмонных мод. Состав МПлК – $\text{Ag}(100 \text{ нм})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(70 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(15 \text{ нм})$. В работе рассмотрены образцы, обладающие FF в диапазоне от 0.99 до 0.62, которые достигались путем уменьшения площади отдельных колонн при

сохранении периода МПлК в 610 нм. Экспериментально показано, что величина δ_{\max} находится в немонотонной зависимости от FF решетки с экстремумом в 0.89 % при FF 0.77 и 0.66.

- 5 При уменьшении FF двумерных МПлК с периодом 600 ± 10 нм за счет уменьшения размеров колонн наблюдается рост H_c при их перемагничивании вдоль G_x и G_y . Установлено, что для МПлК с FF менее 0.81 наблюдается двухступенчатое перемагничивание в плоскости образцов вдоль G_x и G_y , обусловленное зарождением доменов на краевых дефектах образцов, обусловленных применением метода электронно-лучевой литографии, использованным для изготовления двумерных структур.
- 6 Полевая зависимость δ на резонансной длине волны выполняет роль передаточной функции, позволяющей определить напряженность магнитного поля, приложенного в плоскости МПлК совместно с H_{AC} . Форма передаточной функции определяется дифференциальной магнитной восприимчивостью МПлК, а максимальное значение передаточной функции соответствует δ_{\max} на резонансной длине волны. Продемонстрировано, что чувствительность МПлК к внешнему магнитному полю и ΔH определяется комбинацией δ_{\max} и наклона передаточной функции. Максимальная чувствительность 8 %/Э была достигнута для МПлК, имеющим состав Ag(50 нм)/Ni₈₀Fe₂₀(5 нм)/Si₃N₄(10 нм), с периодом 320 нм и высотой профиля 20 нм. Продемонстрировано, что переход к двумерным МПлК с квадратно упорядоченной решёткой и общим составом Ag(100 нм)/Ni₈₀Fe₂₀(70 нм)/Si₃N₄(15 нм) приводит к уменьшению чувствительности на два порядка величины, но сопровождается стократным увеличением ΔH .
- 7 Разработана методика изготовления серии двумерных МПлК с квадратно упорядоченной решеткой на одной подложке с различным значением FF . На основе результатов исследования магнитных, оптических и магнитооптических свойств двумерных МПлК разработан алгоритм подбора оптимального FF , при котором достигаются идентичные спектральные и полевые зависимости δ при перемагничивании образцов вдоль G_x и G_y .

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

- A1. **Murzin D.**, Belyaev V., Kern J., Kaspar C., Pernice W.H., Bratschitsch R., Rodionova V. “Transversal Kerr Effect Enhancement of Permalloy-Based Shallow Lamellar Magnetoplasmonic Crystals” // *Photonics*. — 2022. — Vol. 9. — No. 12. — P. 989, <https://doi.org/10.3390/photonics9120989>, IF=2.1 (JCR), объем — 0.44 п.л., личный вклад автора — 0.7.
- A2. **Murzin D.V.**, Frolov A.Yu., Mamian K.A., Belyaev V.K., Fedyanin A.A., Rodionova V.V. “Low coercivity magnetoplasmonic crystal based on a thin permalloy film for magnetic field sensing applications” // *Optical Materials Express*. — 2023. — Vol. 13. — No. 1. — P. 171, <https://doi.org/10.1364/OME.478112>, IF=2.8 (JCR), объем — 0.5 п.л., личный вклад автора — 0.8.
- A3. Grigoreva Z.A., **Murzin D.V.**, Gritsenko Ch.A., Kozlov A.G., Ognev A.V., Rodionova V.V., Belyaev V.K. “Permalloy-Based 2D-Magnetoplasmonic Crystals: Synthesis and Magneto-Optical Properties” // *Physics of Metals and Metallography*. — 2023. — Vol. 124. — No. 14. — P. 1682-1688, <https://doi.org/10.1134/S0031918X2360197X>, IF=1.1 (JCR), объем — 0.44 п.л., личный вклад автора — 0.35.
- A4. **Murzin D.V.**, Belyaev V.K., Gritsenko K.A., Rodionova V.V. “Effect of Filling Factor on the Coefficient of Reflection and Transversal Kerr Effect of 2D Permalloy-Based Magnetoplasmonic Crystals” // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2024. — Vol. 88. — No. 4. — P. 591-596, <https://doi.org/10.1134/S1062873823706384>, IF=0.21 (SJR), объем — 0.36 п.л., личный вклад автора — 0.75.
- A5. **Murzin D.V.**, Belyaev V.K., Mamian K.A., Groß F., Gräfe J., Frolov A.Y., Fedyanin A.A., Rodionova V.V. “Ni₈₀Fe₂₀ Thickness Optimization of Magnetoplasmonic Crystals for Magnetic Field Sensing” // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2024. — P. 115552, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115552>, IF=4.1 (JCR), объем — 0.44 п.л., личный вклад автора — 0.7.
- A6. **Murzin D.**, Belyaev V., Gritsenko C., Komanicky V., Rodionova V. “Magnetic field sensing elements based on Ni₈₀Fe₂₀ 2D magnetoplasmonic crystals” // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2024. — Vol. 377. — P. 115773, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115773>, IF=4.1 (JCR), объем — 0.44 п.л., личный вклад автора — 0.7.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qin J., Xia S., Yang W., Wang H., Yan W., Yang Y., Wei Z., Liu W., Luo Y., Deng L., Bi L. Nanophotonic devices based on magneto-optical materials: recent developments and applications // *Nanophotonics*. — 2022. — Vol. 11. — Nanophotonic devices based on magneto-optical materials. — No. 11. — P. 2639-2659.
2. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M., Kotov V.A., Kasture S., Vengurlekar A.S., Gopal A.V., Yakovlev D.R., Zvezdin A.K., Bayer M. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals // *Nature Nanotechnology*. — 2011. — Vol. 6. — No. 6. — P. 370-376.
3. Knyazev G.A., Kapralov P.O., Gusev N.A., Kalish A.N., Vetoshko P.M., Dagesyan S.A., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I. Magnetoplasmonic Crystals for Highly Sensitive Magnetometry // *ACS Photonics*. — 2018. — Vol. 5. — No. 12. — P. 4951-4959.
4. Belyaev V.K., Rodionova V.V., Grunin A.A., Inoue M., Fedyanin A.A. Magnetic field sensor based on magnetoplasmonic crystal // *Scientific Reports*. — 2020. — Vol. 10. — No. 1. — P. 7133.
5. Grunin A.A., Mukha I.R., Chetvertukhin A.V., Fedyanin A.A. Refractive index sensor based on magnetoplasmonic crystals // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2016. — Vol. 415. — P. 72-76.
6. Kiryanov M.A., Frolov A.Yu., Novikov I.A., Kipp P.A., Nurgalieva P.K., Popov V.V., Ezhov A.A., Dolgova T.V., Fedyanin A.A. Surface profile-tailored magneto-optics in magnetoplasmonic crystals // *APL Photonics*. — 2022. — Vol. 7. — No. 2. — P. 026104.

Мурзин Дмитрий Валерьевич

**РЕЗОНАНСНЫЙ ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ КЕРРА В МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ
КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ ПЕРМАЛЛОЯ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 05.11.2024 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5
Тираж 80 экз. Заказ 118

Отпечатано в Полиграфическом центре
Балтийского федерального университета им. И. Канта
236001, г. Калининград, ул. Гайдара, 6