

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЧЕХОВ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ

**РЕЗОНАНСНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В
ОДНОМЕРНЫХ МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ
КРИСТАЛЛАХ**

Специальность
01.04.21 — лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2018

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники
физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент
Мурзина Татьяна Владимировна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего образо-
вания «Московский государственный универ-
ситет имени М.В. Ломоносова», Физический
факультет, Кафедра фотоники и физики мик-
роволн, доцент

Белотелов Владимир Игоревич

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физико-технический ин-
ститут им. А.Ф. Иоффе Российской академии
наук, Лаборатория оптических явлений в се-
гнетоэлектрических и магнитных кристаллах,
главный научный сотрудник - заведующий
лабораторией

Павлов Виктор Владимирович

кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теоретической
и прикладной электродинамики Российской
академии наук, Лаборатория №1 - теорети-
ческой электродинамики конденсированного
состояния, ведущий научный сотрудник

Дорофеенко Александр Викторович

Защита состоится “ 17 ” МАЯ 2018 г. в 15 ч. 15 мин. на заседании
диссертационного совета МГУ.01.13 Московского государственного универси-
тета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы 1,
стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

E-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе дис-
сертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова
(Ломоносовский пр-т, д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»
https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/33919655/.

Автореферат разослан “ 10 ” АПРЕЛЯ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию резонансных линейных и нелинейных магнитооптических эффектов в одномерных магнитоплазмонных кристаллах, состоящих из периодической решетки золота, нанесенной на пленку феррит-граната.

Актуальность темы диссертации

В настоящее время актуальны разработки методов исследования наноструктурированных сред и управления их основными характеристиками. Современные технологические возможности создания наноструктур выводят процессы взаимодействия излучения и вещества на масштабы, меньшие длины волны света. Наноразмерные фотонные структуры, сочетающие функциональность и компактность, интересны для создания новых устройств, в которых происходит эффективное управление процессом взаимодействия света с веществом.

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) и локальные плазмоны позволяют эффективно локализовать электромагнитное излучение, преодолевая дифракционный предел [1, 2, 3]. Эти возбуждения, локализованные на границе раздела металл/диэлектрик, открывают возможности для наблюдения и контроля процессов на наномасштабах. Сильная локализация электромагнитного поля ППП приводит к увеличению взаимодействия света и электронной системы материалов и, в частности, к увеличению магнитооптических эффектов, связанных с взаимодействием электромагнитного излучения и спиновой системы [4]. Изучением таких процессов занимается новая и активно развивающаяся область физики - магнитоплазмоника [5, 6].

Магнитоплазмонные структуры обладают свойствами магнитных материалов и одновременно предоставляют возможность к возбуждению поверхностных плазмон-поляритонов или локальных плазмонов. Благодаря высокой локализации поля в магнитной среде, удастся наблюдать новые линейные и нелинейные магнитооптические эффекты [7]. Особой чувствительностью к поверхностной локализации поля и намагниченности среды обладает процесс поверхностной генерации второй гармоники [8]. Примене-

ние методов магнитоиндуцированной генерации второй гармоники к магнитоплазмонным структурам позволяет глубже понять процессы, происходящие на наномасштабах, предоставляя информацию о фазе и амплитуде электромагнитных полей, динамике спиновой системы и особенностях нелинейно-оптического отклика среды [9]. Среди многообразия геометрий магнитоплазмонных структур интересны магнитоплазмонные кристаллы, в которых возбуждение ППП происходит за счет дифракции света на металлической решетке, а магнитными свойствами обладает либо диэлектрик (феррит-гранаты) [4], либо металл (Co, Ni, Fe) [10]. До недавнего времени исследования генерации второй гармоники проводились лишь для магнитоплазмонных кристаллов на основе ферромагнитных металлов [11].

Исследования в области плазмоники также актуальны для создания новых устройств записи и хранения информации. Фотомагнитные и оптомагнитные эффекты позволяют управлять состоянием намагниченности на масштабах пикосекунд при помощи электромагнитного излучения без лишнего нагрева системы [12, 13]. В настоящий момент ведутся активные исследования устройств и материалов, демонстрирующих высокую эффективность оптического возбуждения магнитной системы. Большие значения обратного эффекта Фарадея и фотомагнитного эффекта наблюдаются в феррит-гранатах [14, 15, 16], и для практических применений необходима разработка методов локализации возбуждения динамики намагниченности в данных материалах. В качестве одного из решений данной проблемы рассматриваются магнитоплазмонные структуры [17].

Таким образом, изучение магнитоплазмонных структур является актуальной темой исследований, открывающей новые методы изучения магнитных процессов на наномасштабах и позволяющей наблюдать новые линейные и нелинейные магнитооптические эффекты.

Цель работы

Цель диссертационной работы состояла в экспериментальном исследовании линейных и нелинейных магнитооптических эффектов, а также динамики намагниченности в одномерных магнитоплазмонных кристаллах со структурой золото/феррит-гранат при возбуждении в них поверхностных плазмон-поляритонов и волноводных мод. В рамках поставленной цели

были сформулированы следующие задачи:

- Исследовать линейные интенсивностные магнитооптические эффекты в магнитоплазмонных кристаллах золото/феррит-гранат, полученных методом комбинированного ионно-лучевого травления.
- Изучить основные свойства генерации второй гармоники при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов и волноводных мод в одномерных магнитоплазмонных кристаллах золото/феррит-гранат.
- Исследовать обратный эффект Фарадея и индуцированную им динамику намагниченности в магнитоплазмонных кристаллах при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов.

Обоснованность и достоверность

Результаты, представленные в данной диссертации, были получены на современном оборудовании и подтверждались хорошей повторяемостью экспериментальных данных. Полученные в экспериментах величины количественно согласуются с расчетными. Результаты, изложенные в диссертационной работе, неоднократно докладывались на специализированных международных и российских конференциях.

Научная новизна

- В магнитоплазмонных кристаллах золото/феррит-гранат, изготовленных методом комбинированного ионно-лучевого травления, обнаружен нечетный интенсивностный магнитооптический эффект в геометрии на пропускание при возбуждении волноводных мод в слое граната.
- Впервые продемонстрирован эффект асимметрии генерации второй гармоники относительно угла падения в магнитоплазмонном кристалле золото/анизотропный диэлектрик и резонансное усиление данного эффекта при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела золото/феррит-гранат.

- Обнаружено усиление генерации второй оптической гармоники и нелинейного магнитооптического эффекта при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела золото-гранат в магнитоплазмонном кристалле.
- Впервые экспериментально исследована динамика намагниченности в магнитоплазмонном кристалле золото/феррит-гранат методом накачка-зондирование при возбуждении прецессии за счет обратного эффекта Фарадея.
- Обнаружено резонансное усиление эффективности возбуждения обменной моды прецессии намагниченности в спектральной окрестности резонанса поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела золото/ферритмагнитный диэлектрик.

Практическая значимость

В диссертационной работе продемонстрированы уникальные оптические и нелинейно-оптические свойства магнитоплазмонных кристаллов со структурой золото/феррит-гранат, связанные с резонансным возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов на границах раздела с металлом и волноводных мод в слое магнитного диэлектрика. Продемонстрировано, что новый метод комбинированного ионно-лучевого травления позволяет формировать структуры с заданными резонансными особенностями, в окрестности которых наблюдается значительное усиление оптических и магнитооптических эффектов, что открывает широкие возможности для создания на основе МПК устройств сенсорики и фотоники. Результаты, полученные при исследовании динамики намагниченности в магнитоплазмонных кристаллах, перспективны для создания новых устройств оптической записи информации.

Защищаемые положения:

1. Возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела золото/феррит-гранат и волноводных мод в пленке граната, входящей в состав магнитоплазмонного кристалла, приводит к резонанс-

ному усилению линейного интенсивностного магнитооптического эффекта в геометрии на пропускание.

2. Возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов в магнитоплазмонном кристалле на границе раздела золото/феррит-гранат приводит к знакопеременной модуляции нелинейного магнитного контраста и изменению относительной фазы магнитоиндуцированной составляющей поля второй гармоники.
3. В магнитоплазмонных кристаллах, в состав которых входит пленка эпитаксиального анизотропного феррит-граната, наблюдается эффект угловой асимметрии генерации второй гармоники, усиливающийся при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела золото/феррит-гранат.
4. Эффективное магнитное поле, индуцируемое при возбуждении ППП в слое феррит-граната за счет обратного эффекта Фарадея, приводит к модуляции амплитуды и фазы прецессии намагниченности в ферромагнетике.
5. Эффективность возбуждения субтерагерцовой прецессии намагниченности в одномерных магнитоплазмонных кристаллах возрастает на два порядка при резонансном возбуждении поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела золото/феррит-гранат.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в данной диссертационной работе, были получены при определяющем участии автора: проведена сборка экспериментальных установок, получены экспериментальные результаты, проведены аналитические и численные вычисления. Публикации по теме диссертации были написаны при определяющем участии автора. Измерения были проведены в «Лаборатории нелинейной оптики наноструктур и фотонных кристаллов» на кафедре Квантовой электроники Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, а также в «Лаборатории магнетизма» Физического факультета Белостокского государственного университета, г. Белосток, Польша.

Апробация работы

Результаты, описанные в диссертационной работе, были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. **А.Л. Чехов**, В.Л. Крутянский, А.И. Шайманов, А.И. Стогний, Т.В. Мурзина, Нанопфизика и наноэлектроника, Нижний Новгород (2014)
2. **V.L. Krutyanskiy**, A.L. Chekhov, A.I. Stognij, and T.V. Murzina, Moscow International Symposium on Magnetism, Москва (2014)
3. **A.L. Chekhov**, V.L. Krutyanskiy, A.I. Stognij, and T.V. Murzina, International symposium Spin Waves, Санкт-Петербург (2015)
4. **A. Chekhov**, I. Razdolski, A. Kirilyuk, Th. Rasing, A. Stognij, and T. Murzina, Conference on Lasers and Electro-Optics, Сан Хоце (2016)
5. **A.L. Chekhov**, I. Razdolski, A.I. Stognij, T. Satoh, T.V. Murzina, and A. Stupakiewicz, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, Мюнхен (2017)
6. **A. Chekhov**, P. Naydenov, A. Stognij, and T. Murzina, Frontiers in Optics, Вашингтон (2017)
7. **А.Л. Чехов**, А.И. Стогний, Т. Сато, Т.В. Мурзина, И. Раздольский, А. Ступакевич, Нанопфизика и наноэлектроника, Нижний Новгород (2018)

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитированной литературы. Работа состоит из 114 страниц, содержит 38 иллюстраций, 1 таблицу и 160 библиографических ссылок.

Содержание работы

Во введении отмечается актуальность диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, а также формулируются цели и задачи работы. Приводятся выносимые на защиту положения и сведения об апробации результатов работы.

В первой главе приводится обзор литературы, связанной с тематикой диссертационной работы. В §1.1-1.3 описаны линейные магнитооптические эффекты и их механизмы, а также проведен анализ результатов современных экспериментальных исследований линейных оптических эффектов в магнитоплазмонных структурах, поддерживающих возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) и локальных плазмонов. Отмечается наличие интенсивного нечетного магнитооптического эффекта в экваториальном магнитном поле при прохождении излучения через магнитоплазмонные структуры за счет магнитоиндуцированного смещения закона дисперсии ППП.

В §1.4-1.5 описаны нелинейные магнитооптические эффекты и, в частности, процесс генерации второй гармоники (ГВГ) в присутствии статического магнитного поля. Показано, что ГВГ чувствительна к модуляциям амплитуды и фазы поля накачки, а также приводятся результаты современных исследований ГВГ в магнитоплазмонных структурах.

В §1.6 кратко описаны механизмы оптического возбуждения сверхбыстрой динамики намагниченности в металлах и диэлектриках. Приведена базовая теория обратного эффекта Фарадея и прецессии намагниченности, а также рассмотрены первые работы, посвященные локализации возбуждения намагниченности в плазмонных структурах.

Во второй главе описываются линейные магнитооптические эффекты, наблюдаемые в одномерных магнитоплазмонных кристаллах со структурой золото/феррит-гранат, изготовленных с использованием метода комбинированного ионно-лучевого травления.

В §2.1 подробно описывается метод изготовления структур, который заключается в структуризации пленки золота сначала сфокусированным,

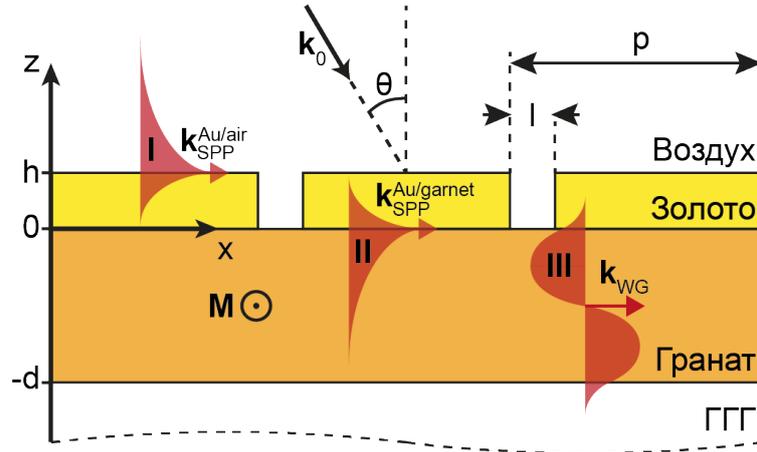


Рис. 1. Схематическое изображение структуры магнитоплазмонных кристаллов, изученных в диссертационной работе. Качественно показаны распределения компонент H_y для полей поверхностных плазмон-поляритонов на границах раздела золото/воздух (I) и золото/феррит-гранат (II), а также для ТМ волноводной моды первого порядка (III). Намагниченность M направлена перпендикулярно плоскости рисунка.

а затем расфокусированным ионным пучком. Структуры изготавливались под руководством к. ф.-м. н. Стогния А.И. в НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск. Описанным методом были изготовлены магнитоплазмонные кристаллы с периодами $p = 450 \div 850$ нм, шириной канавок $l = 80 \div 200$ нм, толщиной золота $h \approx 50$ нм на основе эпитаксиальных пленок гранатов с толщинами $d = 2 \div 380$ мкм. Схематическое изображение структуры магнитоплазмонного кристалла представлено на Рис. 1. Показана система координат, используемая в тексте диссертации, а также отмечены области резонансных возбуждений в структуре.

В §2.2 представлены частотно-угловые спектры пропускания магнитоплазмонных кристаллов, особенности в которых связываются с различными резонансными распространяющимися оптическими модами в МПК (Рис. 1): поверхностные плазмон-поляритоны на границах раздела золото/воздух (I) и золото/феррит-гранат (II), а также волноводные моды в слое граната (III). Положения резонансных особенностей (сплошные линии на Рис. 2(а,в)) рассчитаны с учетом законов дисперсии различных мод $k_{\text{mode}}(\omega)$ и условия фазового синхронизма при дифракции на золо-

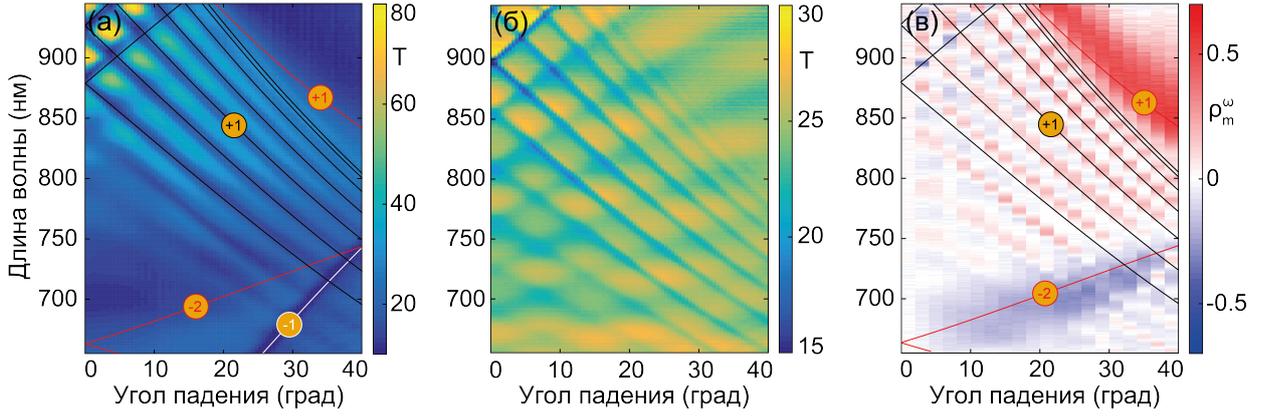


Рис. 2. Частотно-угловые спектры пропускания для МПК с периодом 450 нм при р-поляризованном (а) и s-поляризованном (б) изучении. (в) Частотно-угловой спектр магнитного контраста в экваториальной геометрии при прохождении р-поляризованного излучения через МПК с периодом 450 нм. Цифрами в кружках обозначены порядки возбуждения ППП, а линии соответствуют аналитически рассчитанным положениям возбуждений ППП золото/воздух (белые), ППП золото/феррит-гранат (красные) и ТМ волноводных мод (черные).

той решетке: $k_{\text{mode}}(\omega) = k_0 \sin \theta + m2\pi/p$, где k_0 - волновой вектор света в вакууме, θ - угол падения излучения и m - дифракционный порядок. Расчеты дают хорошее согласие с экспериментальными данными, а спектры пропускания структур с различными периодами указывают на возбуждение мод до 3го порядка дифракции. В работе показано, что варьирование параметров МПК и углов падения позволяет спектрально перестраивать резонансы в структурах в соответствии с условием фазового синхронизма. На Рис. 2(а,б) показаны характерные спектры пропускания для МПК с периодом 450 нм при р- и s-поляризованном излучении. В первом случае видны все три типа возбуждений, в то время как в случае s-поляризации возбуждаются только поперечно-электрические (ТЕ) волноводные моды.

В §2.3 представлены частотно-угловые спектры магнитного контраста для прошедшего излучения при экваториальной намагниченности пленки граната: $\rho_m^\omega = [T(+M) - T(-M)]/[T(+M) + T(-M)]$, где $T(\pm M)$ - величины пропускания для противоположных направлений намагниченности. Спектральный сдвиг дисперсионных зависимостей для поперечно-

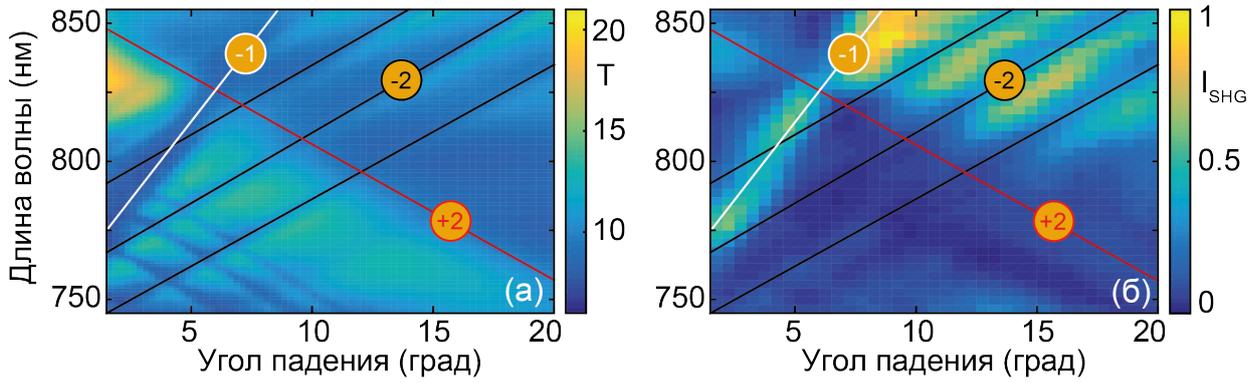


Рис. 3. Частотно-угловые спектры пропускания (а) и интенсивности второй гармоники (б) для МПК с периодом 750 нм. Цифрами в кружках обозначены порядки возбуждения ППП, а линии соответствуют аналитически рассчитанным положениям возбуждений ППП золото/воздух (белые), ППП золото/феррит-гранат (красные) и волноводных мод (черные).

магнитных (ТМ) волноводных мод и поверхностных плазмон-поляритонов линейно зависит от экваториальной компоненты намагниченности, что обуславливает появление магнитного контраста для таких мод (Рис. 2(в)). Напротив, ППП золото/воздух и ТЕ волноводные моды не дают вклада в магнитный контраст интенсивностного экваториального эффекта в геометрии на пропускание (при s-поляризованном излучении величина магнитного контраста не превосходила 5×10^{-4}). Максимальные значения магнитного контраста при возбуждении ППП золото/феррит-гранат и ТМ волноводных мод составили 7×10^{-3} и 3×10^{-3} , соответственно, что в несколько раз превосходит величину магнитного контраста для пленки феррит-граната без золотой решетки, составляющего $\approx 1 \times 10^{-3}$.

В третьей главе изучается нелинейный оптический отклик магнитоплазмонных кристаллов на частоте второй гармоники (ВГ). В качестве накачки используется перестраиваемый фемтосекундный титан-сапфировый лазер с длительностью импульсов 100 фс. Излучение накачки фокусировалось на структуру со стороны подложки, а сигнал ВГ регистрировался в прошедшем излучении для р-поляризации излучения накачки и второй гармоники. Исследования проводились для двух МПК с периодами 750 и 850 нм, на основе пленки висмут-тулиевого феррит-граната $(\text{Bi, Tm})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с кристал-

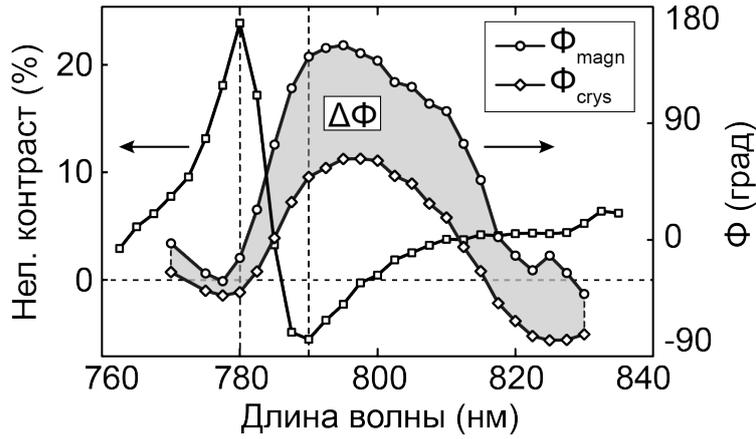


Рис. 4. Спектры нелинейного магнитного контраста и фаз магнитного (Φ_{magn}) и немагнитного (Φ_{crys}) вкладов в поле на частоте второй гармоники. Измерения проведены для МПК с периодом 750 нм и угла падения 10° .

лографической ориентацией (210). Показано, что в частотно-угловых спектрах интенсивности ВГ наблюдаются резонансные особенности, связанные с локализацией электромагнитного поля накачки на различных интерфейсах при возбуждении каждой из трех мод в МПК (Рис. 3).

В §3.2 приведены результаты исследования нелинейного магнитооптического эффекта при возбуждении ППП золото/феррит-гранат – измерены спектры нелинейного магнитного контраста во внешнем экваториальном магнитном поле при генерации второй гармоники в геометрии на пропускание $\rho_m^{2\omega} = [I^{2\omega}(+M) - I^{2\omega}(-M)]/[I^{2\omega}(+M) + I^{2\omega}(-M)]$, где $I^{2\omega}(\pm M)$ – интенсивности ВГ для противоположных направлений намагниченности. Спектр нелинейного контраста для МПК с периодом 750 нм при угле падения излучения накачки 10° показан на Рис. 4. Видно, что возбуждение ППП на границе раздела золото/феррит-гранат приводит к резонансной знакопеременной модуляции нелинейного магнитного контраста, достигающего значения 25%. Для определения механизмов, отвечающих за модуляцию нелинейного контраста, было проведено измерение фаз кристаллографического (немагнитного) и магнитного вкладов в электрическое поле на частоте второй гармоники. Для этого использовался эталонный источник ВГ и снимались зависимости сигнала ВГ от расстояния между образцом и эталоном. Полученные зависимости (Рис. 4) показывают, что в окрестности резонанса ППП фаза магнитного вклада испытывает

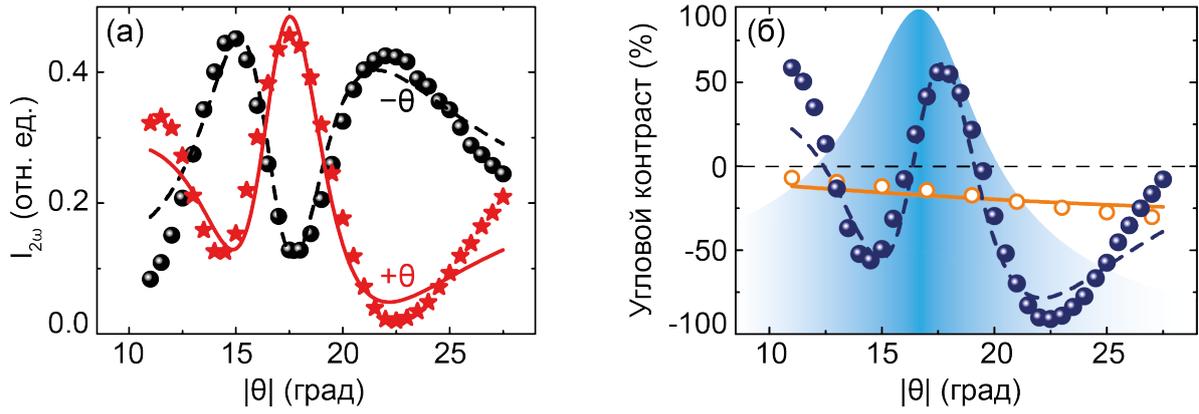


Рис. 5. (а) Угловые зависимости интенсивности ВГ для МПК с периодом 850 нм при противоположных углах падения накачки в окрестности возбуждения ППП золото/феррит-гранат ($\approx 17^\circ$). Длина волны накачки 850 нм. (б) Зависимости углового контраста от угла падения для пленки граната (пустые кружки) и МПК при возбуждении ППП золото/феррит-гранат (заполненные кружки). Кривые на рисунках соответствуют аналитической модели.

большую модуляцию, чем фаза кристаллографического вклада. Такое поведение можно объяснить наличием нерезонансного немагнитного вклада в ГВГ от границы раздела золото/воздух, который складывается с резонансным немагнитным вкладом от интерфейса золото/феррит-гранат и таким образом уменьшает результирующий фазовый сдвиг.

В §3.3 изучен эффект асимметрии ГВГ по отношению к углу падения и возможность его усиления при возбуждении ППП на анизотропной поверхности. Показано, что данная асимметрия ГВГ может наблюдаться в случае, когда в тензоре квадратичной восприимчивости поверхности $\hat{\chi}^{(2)}$ имеются как компоненты с четным числом индексов z , так и с нечетным числом таких индексов, приводящие к появлению, соответственно, четной и нечетной зависимости интенсивности ГВГ по отношению к углу падения. Данное условие соблюдается для грани (210) монокристалла феррит-граната. Полученные в эксперименте частотно-угловые спектры для МПК с периодом 850 нм выявляют сильную асимметрию ГВГ относительно угла падения в окрестности возбуждения ППП золото/феррит-гранат. Угловые спектры интенсивности ВГ для длины волны накачки 850 нм и противо-

ложных по знаку углов падения представлены на Рис. 5(а).

Для характеристики эффекта угловой асимметрии вводится величина углового контраста $\rho_{\theta}^{2\omega} = [I^{2\omega}(+\theta) - I^{2\omega}(-\theta)]/[I^{2\omega}(+\theta) + I^{2\omega}(-\theta)]$, где $I^{2\omega}(\pm\theta)$ - интенсивность ВГ для противоположных углов падения накачки. Угловые знакопеременные зависимости величины $\rho_{\theta}^{2\omega}$ для пленки граната и для МПК на ее основе при возбуждении ППП на границе раздела золото/феррит-гранат и при длине волны накачки 850 нм показаны на Рис. 5(б). Показано, что угловая асимметрия значительно увеличивается при возбуждении ППП и достигает 95%. В рамках диссертационной работы построена аналитическая модель, описывающая зависимости углового контраста от угла падения для пленки граната и для МПК при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела золото/феррит-гранат. В модели учитывались компоненты $\hat{\chi}^{(2)}$, соответствующие симметрии интерфейсов и дающие максимальный вклад в ГВГ с учетом численных расчетов распределения полей при возбуждении ППП в магнитоплазмонном кристалле. В случае поверхности феррит-граната (210) были учтены две компоненты квадратичной восприимчивости разной четности: $\chi_{xxx}^{(2)}$ и $\chi_{zxx}^{(2)}$, приводящие к следующей зависимости интенсивности ВГ от угла падения θ :

$$I_{\text{granet}}^{2\omega}(\pm\theta) \propto \left| \left(\chi_{xxx}^{(2)} \cos^3 \theta \pm \chi_{zxx}^{(2)} \sin(\pm\theta) \cos^2 \theta \right)^2 \right|. \quad (1)$$

Аналогично, в случае МПК были учтены вклады двух компонент квадратичной восприимчивости - четной по углу падения компоненты $\chi_{2xzz}^{(2)}$ интерфейса золото/феррит-гранат (2) и нечетной по углу падения компоненты $\chi_{1zxx}^{(2)}$ интерфейса золото/воздух (1). Описывая поле поверхностного плазмона $E_{2z}^R(\theta)$ на частоте накачки лоренцевской резонансной формой (закрашенная область на Рис. 5(б)) и учитывая нерезонансные составляющие полей E_{2z}^{NR} и E_{1x}^{NR} на обоих интерфейсах, было получено выражение для интенсивности ВГ в зависимости от угла падения при возбуждении ППП:

$$I_{\text{MPC}}^{2\omega}(\pm\theta) \propto \left| \left(\chi_{2xzz}^{(2)} [E_{2z}^{NR} + E_{2z}^R(\theta)]^2 \cos(\theta) \pm \chi_{1zxx}^{(2)} [E_{1x}^{NR}]^2 \sin(\pm\theta) \right)^2 \right|. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) позволили качественно аппроксимировать экспериментальные результаты (штриховая и сплошная кривые на Рис. 5(а,б)).

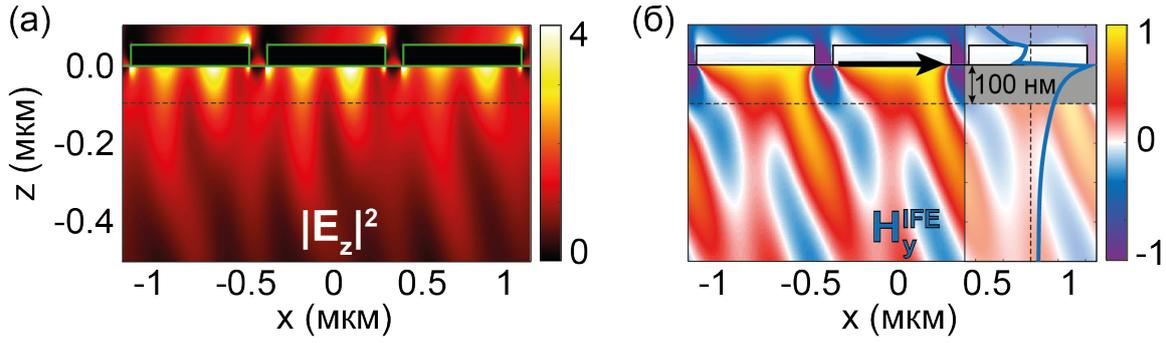


Рис. 6. Численный расчет распределения модуля квадрата z -компоненты электрического поля (а) и эффективного статического магнитного поля (б) в МПК с периодом 800 нм при возбуждении ППП золото/феррит-гранат. Длина волны излучения 1450 нм. Стрелка указывает направление распространения поверхностного плазмон-поляритона.

В четвертой главе приводятся результаты исследования динамики намагниченности в МПК, возбужденной за счет обратного эффекта Фарадея.

В §4.1 проводится теоретический анализ возможности наведения эффективного магнитного поля за счет обратного эффекта Фарадея при возбуждении ППП на границе раздела с гиротропным диэлектриком. Расчеты проводились с использованием известных выражений для электрического поля поверхностного плазмона и феноменологического выражения для эффективного статического магнитного поля, создаваемого в объеме гиротропной среды электрическим полем с эллиптической поляризацией $\mathbf{H}^{\text{IFE}} = \chi^{(m)} : [\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*]$, где $\chi^{(m)}$ - магнитооптическая восприимчивость среды. Показано, что поверхностный плазмон-поляритон, распространяющийся вдоль оси x (см. Рис. 1), будет создавать в диэлектрике эффективное статическое магнитное поле следующего вида:

$$H_y^{\text{IFE}}(x, z) = 2\chi_{yxz}^{(m)} E_x^2 \frac{k'_x}{k''_z} e^{-2k''_x x} e^{-2k''_z |z|}, \quad (3)$$

где k_x и k_z , соответственно x - и z -компоненты волнового вектора ППП.

Статическое магнитное поле, индуцируемое при возбуждении ППП на границе раздела золото/феррит-гранат, для характерных значений диэлектрических проницаемостей двух сред оказывается локализованным на масштабе 100 нм, что подтверждается численными симуляциями распределения полей в МПК с периодом 800 нм. На Рис. 6(а,б) представлены

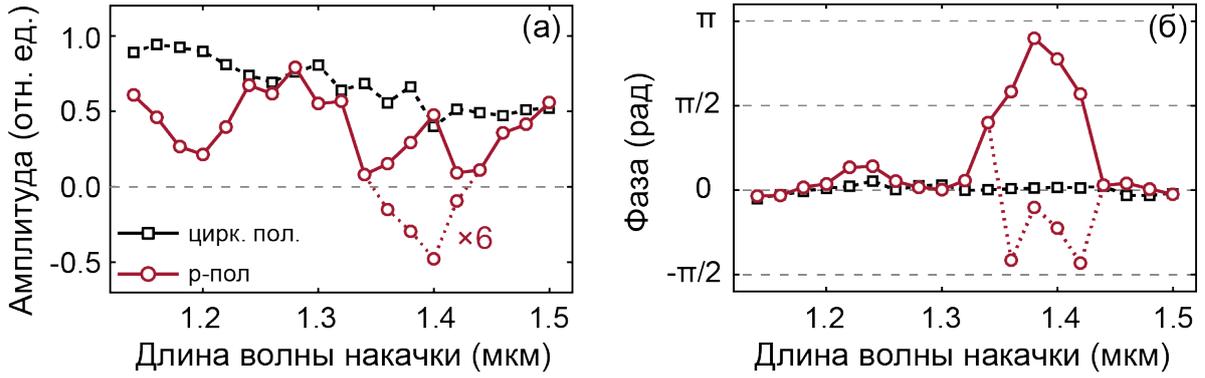


Рис. 7. Зависимости амплитуды (а) и фазы (б) сигналов обменной моды прецессии на частоте 0.41 ТГц в зависимости от длины волны импульса накачки при его циркулярной (квадраты) и линейной (кружки) поляризации.

полученные распределения квадрата модуля поля $|E_z|^2$ и эффективного магнитного поля H_y^{IFE} . Во-первых, эффективное поле локализовано в приповерхностном слое (на вставке показана зависимость усредненного поля от глубины) и, во-вторых, эффективное магнитное поле наводится только в случае р-поляризации излучения, падающего на структуру, а направление H_y^{IFE} определяется направлением распространения ППП.

В §4.2 представлены экспериментальные результаты, полученные с использованием методики накачка-зондирование. Для этих измерений был изготовлен магнитоплазмонный кристалл с периодом 800 нм на основе пленки гадолиний-иттербий-висмутого феррит-граната $\text{Gd}_{4/3}\text{Yb}_{2/3}\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 380 мкм. В гранате данного состава возможно возбуждение обменной моды прецессии с частотой 0.41 ТГц за счет обратного эффекта Фарадея. Подобная прецессия соответствует изменению угла между ферромагнитно связанными намагниченностями подрешеток редкоземельных элементов и переходных металлов, а возбуждение ее возможно благодаря различным магнитным восприимчивостям подрешеток.

В эксперименте измерялась величина фарадеевского вращения линейно-поляризованного зондирующего импульса (800 нм) при его прохождении через структуру для линейной и циркулярной поляризации импульса накачки. Резонансные условия возбуждения ППП в структуре определялись из линейных спектров отражения. Угол падения зондирующего импульса составлял 25 градусов и соответствовал возбуждению ППП на

границе раздела золото/феррит-гранат. Импульс накачки падал на структуру под углом 34 градуса, а его длина волны перестраивалась в спектральной окрестности возбуждения плазмона на той же границе раздела (1400 нм). Из зависимостей модуляции фарадеевского вращения от времени задержки между импульсами накачки и зонда рассчитывались амплитуда и фаза обменной моды прецессии. На Рис. 7(а,б) представлены измеренные зависимости этих величин от длины волны импульса накачки при его линейной и циркулярной поляризации. Обе величины резонансно промодулированы в окрестности возбуждения ППП золото/феррит-гранат при линейной поляризации накачки, в то время как для циркулярной поляризации накачки зависимости не демонстрируют особенностей. Учитывая величины амплитуд прецессии, возбужденной импульсами накачки с разными поляризациями, а также толщину граната и глубину локализации эффективного поля ППП, получено, что при возбуждении плазмона на границе раздела с гиротропным диэлектриком эффективность возбуждения сверхбыстрой прецессии намагниченности возрастает в 4×10^2 раза.

Заключение

Диссертационная работа описывает исследования, проведенные при изучении линейного и нелинейного отклика одномерных магнитоплазменных кристаллов (МПК) со структурой золото/феррит-гранат при резонансном возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) и волноводных мод. Для таких структур изучена динамика намагниченности в магнитном диэлектрике при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов. Получены следующие основные результаты:

1. Исследованы частотно-угловые спектры пропускания одномерных МПК, изготовленных методом комбинированного ионно-лучевого травления в виде полос золота на поверхности феррит-граната с периодом от 450 до 850 нм и шириной просветов между ними от 80 до 200 нм. Показано, что спектры пропускания МПК в зависимости от геометрических параметров структуры содержат целый ряд особенностей, связанных с возбуждением ППП на границах раздела золото/воздух и золото/феррит-гранат, а также волноводных мод в слое

феррит-граната, вплоть до третьего порядка, что отражает высокое качество периодической структуры МПК. Продемонстрировано резонансное усиление нечетного интенсивностного магнитооптического эффекта при возбуждении ППП золото/феррит-гранат и волноводных мод в слое граната, максимальные значения магнитного контраста составили, соответственно, 7×10^{-3} и 3×10^{-3} для структур с периодом 450 нм и шириной канавок 100 нм.

2. Обнаружены резонансные особенности в частотно-угловых спектрах интенсивности генерации второй гармоники (ГВГ) в МПК, связанные с эффектами локализации электромагнитного поля при возбуждении ППП и волноводных мод. С использованием методов спектроскопии экваториального нелинейного магнитооптического эффекта и интерферометрии магнитоиндуцированной второй гармоники (ВГ) показано, что усиление нелинейного магнитного контраста до 25% при возбуждении ППП на границе раздела золото/феррит-гранат обусловлено различием спектральных зависимостей амплитуды и фазы магнитоиндуцированной и немагнитной составляющих поля ВГ в окрестности резонанса ППП.
3. Исследованы механизмы возникновения асимметрии спектров интенсивности ГВГ по отношению к углу падения излучения накачки и ее усиления при возбуждении ППП на анизотропной границе раздела золото/феррит-гранат в магнитоплазмонном кристалле. Показано, что максимальная величина углового контраста достигает величины 95%. Методом интерферометрии второй гармоники показано, что данный эффект связан с фазовой модуляцией локального поля на частоте накачки при взаимодействии с резонансным МПК.
4. Методом накачка-зондирование исследовано влияние возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов на высокочастотную обменную моду прецессии в ферромагнитном диэлектрике - железо-висмутовом гранате, допированном ионами Gd и Yb (GdYbBIG). Экспериментально и с помощью численных расчетов показано, что локализация электромагнитного поля при возбуждении ППП приводит к усиле-

нию обратного эффекта Фарадея в приповерхностном слое GdYbBIG и эффективному возбуждению обменной моды с частотой 0.41 ТГц, фаза которой в резонансных условиях изменяется на π . Численные расчеты распределения эффективного магнитного поля в МПК указывают на локализацию возбуждения динамики намагниченности в приповерхностном слое толщиной 100 нм и увеличении эффективности возбуждения в 4×10^2 раз по сравнению с возбуждением обменной моды циркулярной накачкой в нерезонансных условиях.

Список публикаций по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS и RSCI:

1. **A.L. Chekhov**, V.L. Krutyanskiy, A.N. Shaimanov, A.I. Stognij, and T.V. Murzina, Wide tunability of magnetoplasmonic crystals due to excitation of multiple waveguide and plasmon modes, *Optics Express* **22**, 17762-17768 (2014)
2. **A.L. Chekhov**, V.L. Krutyanskiy, V.A. Ketsko, A.I. Stognij, and T.V. Murzina, High-quality Au/BIG/GGG magnetoplasmonic crystals fabricated by a combined ion-beam etching technique, *Optical Materials Express* **5**, 1647-1652 (2015)
3. V.L. Krutyanskiy, **A.L. Chekhov**, V.A. Ketsko, A.I. Stognij, and T.V. Murzina, Giant nonlinear magneto-optical response of magnetoplasmonic crystals, *Physical Review B* **9**, 121411(R) (2015)
4. **А.Л. Чехов**, П.Н. Найденов, О.В. Голикова, А.В. Беспалов, А.И. Стогний, Т.В. Мурзина, Магнитоплазмонные кристаллы: резонансные линейные и нелинейные магнитооптические эффекты, *Физика твердого тела* **11**, 2171 (2016)
5. **A.L. Chekhov**, I. Razdolski, A. Kirilyuk, Th. Rasing, A.I. Stognij, and T.V. Murzina, Surface plasmon-driven second-harmonic generation asymmetry in anisotropic plasmonic crystals, *Physical Review B* **93**, 161405(R) (2016)

Иные публикации:

1. **A.L. Chekhov**, A.I. Stognij, T. Satoh, T.V. Murzina, I. Razdolski, and A. Stupakiewicz, Surface plasmon-mediated nanoscale localization of laser-driven sub-THz spin dynamics in magnetic dielectrics, arXiv:1712.01617v1 (2017)

Список цитированной литературы

- [1] *Raether H.* Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings. Springer tracts in modern physics no. v. 111. — Springer, 1988.
- [2] *Gramotnev D. K., Bozhevolnyi S. I.* Plasmonics beyond the diffraction limit // *Nature Photonics*. — 2010. — Vol. 4. — Pp. 83 EP —.
- [3] *Zhang J., Zhang L.* Nanostructures for surface plasmons // *Adv. Opt. Photon.* — 2012. — Vol. 4, no. 2. — Pp. 157–321.
- [4] *Belotelov V. I., Akimov I. A., Pohl M., Kotov V. A., Kasture S., Venugurlekar A. S., Gopal A. V., Yakovlev D. R., Zvezdin A. K.* Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals // *Nature Nanotechnology*. — 2011. — Vol. 6. — Pp. 370 EP —.
- [5] *Armelles G., Cebollada A., García-Martín A., González M. U.* Magnetoplasmonics: Combining Magnetic and Plasmonic Functionalities // *Advanced Optical Materials*. — 2013. — Vol. 1, no. 1. — Pp. 10–35.
- [6] *Pellegrini G., Bonanni V., Campo G., Pineider F., Sangregorio C., de Julián Fernández C., Casoli F., Manera M. G., Rella R.* Magnetoplasmonics // *Encyclopedia of Nanotechnology* / Ed. by B. Bhushan. — Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- [7] *Kauranen M., Zayats A. V.* Nonlinear plasmonics // *Nature Photonics*. — 2012. — Vol. 6. — Pp. 737 EP —.
- [8] *Shen Y.* The Principles of Nonlinear Optics. Pure & Applied Optics Series: 1-349. — Wiley, 1984.
- [9] *Zheng W., Liu X., Hanbicki A. T., Jonker B. T., Lüpke G.* Nonlinear magneto-plasmonics // *Optical Materials Express*. — 2015. — Vol. 5, no. 11. — Pp. 2597–2607.

- [10] Grunin A. A., Zhdanov A. G., Ezhov A. A., Ganshina E. A., Fedyanin A. A. Surface-plasmon-induced enhancement of magneto-optical Kerr effect in all-nickel subwavelength nanogratings // *Applied Physics Letters*. — 2010. — Vol. 97, no. 26. — P. 261908.
- [11] Razdolski I., Gheorghe D. G., Melander E., Hjörvarsson B., Patoka P., Kimel A. V., Kirilyuk A., Papaioannou E. T., Rasing T. Nonlocal non-linear magneto-optical response of a magnetoplasmonic crystal // *Phys. Rev. B*. — 2013. — Vol. 88. — P. 075436.
- [12] Pitaevskii L. Electric forces in a transparent dispersive medium // *Sov. Phys. JETP*. — 1961. — Vol. 12, no. 5. — Pp. 1008–1013.
- [13] Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Nonthermal ultrafast optical control of the magnetization in garnet films // *Phys. Rev. B*. — 2006. — Vol. 73. — P. 014421.
- [14] Parchenko S., Stupakiewicz A., Yoshimine I., Satoh T., Maziewski A. Wide frequencies range of spin excitations in a rare-earth Bi-doped iron garnet with a giant faraday rotation // *Applied Physics Letters*. — 2013. — Vol. 103, no. 17. — P. 172402.
- [15] Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A. V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium // *Nature*. — 2017. — Vol. 542. — Pp. 71 EP –.
- [16] Shelukhin L. A., Pavlov V. V., Usachev P. A., Shamray P. Y., Pisarev R. V., Kalashnikova A. M. Ultrafast laser-induced changes of the magnetic anisotropy in a low-symmetry iron garnet film // *Phys. Rev. B*. — 2018. — Vol. 97. — P. 014422.
- [17] Belotelov V. I., Bezus E. A., Doskolovich L. L., Kalish A. N., Zvezdin A. K. Inverse Faraday effect in plasmonic heterostructures // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2010. — Vol. 200, no. 9. — P. 092003.