



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург, 194021

Тел. (812) 297-22-45, факс (812) 297-10-17

post@mail.ioffe.ru, <http://www.ioffe.ru>

ОКПО 02698463, ОГРН 1037804006998

ИНН 7802072267, КПП 780201001

Диссертационный совет МГУ.013.4

МГУ имени М.В. Ломоносова

№ _____

На № _____

от _____

Отзыв официального оппонента

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
Кириянова Максима Андреевича
на тему: «Фемтосекундная динамика оптического отклика металл-диэлектрических метаповерхностей и магнитоплазмонных кристаллов»
по специальности 1.3.19 – «лазерная физика»

Диссертационная работа Кириянова Максима Андреевича посвящена выявлению закономерностей в пикосекундной эволюции оптических резонансов в металл-диэлектрических метаповерхностях и магнитоплазмонных кристаллах. Такие структуры представляют большой интерес, как основа для реализации «активной плазмоники», когда ярко-выраженные спектральные особенности оптического отклика могут эффективно перестраиваться за счёт внешних воздействий. Перестройка оптических резонансов при сверхбыстром лазерном возбуждении позволяет реализовать активную плазмонику с высоким быстродействием. Таким образом, тематика диссертационного исследования является *актуальной с практической точки зрения*. При этом физическая картина отклика даже простых структур – сплошных плёнок – на фемтосекундное оптическое возбуждение на данный момент остаётся сложной фундаментальной проблемой, особенно в части изучения магнитоупорядоченных сред, что делает представленную работу *актуальной и с точки зрения фундаментальной физики*.

Диссертационная работа состоит из *Введения*, где кратко и ёмко изложены задачи, выводы исследования и сформулированы защищаемые положения. *Глава 1* содержит обширный обзор литературы, который отражает тот факт, что исследование

находится на стыке нескольких областей лазерной физики, оптики и магнитооптики. В обзоре приведены как основные базовые понятия физики резонансов в метаповерхностях и плазмонных кристаллах, обсуждается текущее состояние исследований сверхбыстрой оптической динамики в них, а также даётся обзор наработок в области фемтомагнетизма. Глава 1 позволяет читателю легко ориентироваться при изучении последующих оригинальных глав.

Оригинальная часть работы изложена в Главах 2-4. В Главе 2 рассматривается оптический отклик метаповерхности на основе плёнки висмут-замещённого феррита-граната Bi:YIG и массива сфер золота, находящихся внутри этой плёнки. Используя методику фемтосекундной оптической накачки-зондирования соискатель демонстрирует лазерно-индуцированное изменение спектров пропускания в окрестности плазмонных и волноводных резонансов. Приводится детальный анализ вкладов от различных лазерно-индуцированных процессов в наночастицах золота, которые могли бы привести к экспериментально наблюдаемым особенностям. Соискатель убедительно показывает, что нагревы электронной и решёточных подсистем золота являются основными механизмами, ответственными за изменения пропускания в окрестности плазмонных решёточных резонансов структуры. Однако в случае квазиволноводных мод описание экспериментальных результатов потребовало учёта дополнительного, нового для данных структур, механизма – инжекции электронов из золота в феррит-гранат за счёт плазмонов. Этот результат является очень интересным, учитывая значительную величину этого вклада, и, безусловно, повлечёт дальнейшие исследования и уточнения предложенного дополнительного механизма.

Главы 3 и 4 посвящены изучению магнитоплазмонных кристаллов – образцов ферромагнитного металла никеля с синусоидальными профилями поверхности с различной глубиной модуляции. Исследуется эволюция оптических (дифференциальное отражение) и магнитооптических (экваториальный эффект Керра) откликов вблизи плазмонных резонансов при нерезонансном возбуждении. Разная глубина модуляции позволяет изучать отклики либо в режиме оптимального связывания, либо – избыточного. В Главе 3 продемонстрировано, что пикосекундная динамика отражения вблизи плазмонного резонанса оказывается чувствительна к деталям распределения нагрева электронной и фононной подсистем в профилированной структуре. Введено понятие эффективных температур этих подсистем, детектируемых в ближнем поле, что позволило описать нетривиальную динамику отражения, характеризующую немонотонностью изменений по времени. Выявленная нетривиальная динамика и её объяснение является важным новым результатом данного исследования.

В рамках исследования динамики экваториального эффекта Керра, описанного в Главе 4, соискатель обнаружил сложную временную эволюцию этого эффекта, зависящую от глубины модуляции поверхности. Экваториальный эффект Керра определяется намагниченностью материала, а его динамика – лазерно-индуцированным размагничиванием. Однако соискатель убедительно показал, что интерпретация полученных результатов требует знания пространственных распределений полей импульсов накачки и зондирования в образце, неоднородности нагрева. Таким образом, динамика экваториального эффекта Керра оказывается связана с размагничиванием нетривиальным образом, и может наблюдаться переключение знака эффекта при отсутствии переключения намагниченности. Здесь важно отметить, что используемые плотности энергии накачки таковы, что при них в ряде магнитных металлов может наблюдаться оптическое переключение намагниченности. Это подчёркивает, помимо важности самого продемонстрированного эффекта, высокую методическую ценность проведённого анализа для дальнейших исследований лазерно-индуцированного управления намагниченностью в микро- и наноструктурах.

Результаты, описанные в оригинальных главах, обладают *высокой степенью новизны* как в части их наблюдения в конкретных структурах, так и в части обсуждения механизмов возникновения наблюдаемых эффектов. *Обоснованность* сделанных выводов и сформулированных положений подтверждается качественным и количественным согласием между экспериментальными результатам и результатами расчётов, выполненных на основе физически-обоснованных моделей взаимодействия излучения со структурированными средами. *Достоверность* полученных экспериментальных результатов обеспечивается использованием современной методики оптической накачки-зондирования, детальными измерениями спектральных, угловых и интенсивностных зависимостей оптического и магнитооптического отклика структур.

Результаты диссертационной работы *прошли достаточную апробацию* как в форме публикаций в рецензируемых журналах, так и в форме докладов на научных конференциях. *Автореферат* в достаточной мере отражает содержание диссертационной работы, суть проведённых исследований, и позволяет оценить обоснованность сделанных выводов и сформулированных защищаемых положений.

Однако, к диссертационной работе можно высказать следующие замечания и вопросы:

1. Важным и неожиданным результатом Главы 2 является выявление значительного вклада в изменение резонансов и в их динамику от инжекции электронов из золота в феррит-гранат. Ранее такой эффект был изучен только для структур на основе металлов и полупроводников. Важен ли здесь тот факт, что

феррит-гранат является диэлектриком, т.е. инжектированные носители не обладают подвижностью, в отличие от носителей, инжектированных в полупроводники? Можно ожидать, что инжектированные носители будут сильно локализованы вблизи интерфейса золото/гранат. Учитывалось ли это в анализе?

2. В Главе 2 исследуется металл-диэлектрическая метаповерхность на основе Bi:YIG , но не приведён конкретный состав висмут-замещённого феррит-граната. Был ли состав выбран исходя из определённых требований? Так, содержание Bi оказывает влияние на оптические и магнитооптические параметры материала. Из текста не ясно, какие оптические параметры Bi:YIG задавались в процессе моделирования?

3. В Главе 3 изучается оптический отклик и его динамика в профилированном образце никеля. Например, изучается влияние высоты профиля на особенности лазерно-индуцированного нагрева. Результат соответствующих численных расчётов, приведённый на Рис. 61 было бы полезно сравнить с нагревом в непрофилированной плёнке никеля. В частности, насколько значения эффективной температуры электронов и фононов отличаются от тех, которые достигаются при эквивалентном нагреве в сплошной плёнке никеля?

4. Положение 2, сформулированное на основании результатов Главы 3, подразумевает, что форма релаксационных кривых дифференциального отражения определяется высотой плазмонного кристалла независимо от формы профиля. При этом Положение сформулировано на основе исследования только плазмонного кристалла с синусоидальным профилем. Насколько справедливо сделанное обобщение? Интересно, как ситуация изменится при переходе к режиму слабого связывания при высотах меньших оптимальной? Почему такой режим не исследовался ни экспериментально, ни численно?

5. В Главе 3 для численного моделирования лазерно-индуцированных изменений намагниченности и экваториального эффекта Керра используется аналитическое решение микроскопической трёх-температурной модели, которое, строго говоря, применимо только для малых возбуждений и относительно небольших нагревов. Возможно, расхождение между экспериментальными и численными результатами, наблюдаемое соискателем, связано и с этим фактом.

6. Текст диссертации не лишён технических недочётов. Так, на стр. 14 и 15 имеется ссылка на панель (в) рисунка 1, однако данный рисунок не содержит такой панели. В тексте встречаются опечатки и несогласованные предложения, что, однако, не затрудняет чтение и понимание содержания работы.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19 – «лазерная физика»

(по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1- 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Кирьянов Максим Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

PhD (кандидат физико-математических наук, распоряжение Правительства РФ № 186-р от 30.01.2023),

Ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физики ферроиков
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Александра Михайловна Калашникова

«25» 11 2025

Контактные данные:

тел.: +7(812)292-69-73, e-mail: kalashnikova@mail.ioffe.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

тел.: +7(812)292-69-73, e-mail: kalashnikova@mail.ioffe.ru

Подпись сотрудника ФГБУН ФТИ им. А. Ф. Иоффе А.М. Калашниковой
удостоверяю:

Ученый секретарь

канд. физ.-мат. наук

М.И. Патров

« » _____ 2025