

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Фролова Александра Юрьевича

на тему: «Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия
кремниевых наноплазмонных антенн и магнитооптическая спектроскопия
плазмонных наноплазмонных антенн»

по специальности 1.3.19 – «лазерная физика»

В диссертационной работе А.Ю. Фролова рассмотрено изучение ближнепольного распределения оптических мод высокого порядка типа Ми и Фабри-Перо в кремниевых наноплазмонных антеннах различных форм: прямоугольного стержня и призм с круглым, квадратным и треугольным основаниями. Для определения ближнепольного распределения оптических мод использовался метод апертурной сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ). Часть работы также посвящена изучению магнитоиндуцированной модуляции света при возбуждении поверхностных решеточных плазмонных мод второго и третьего порядка в магнитоплазмонных кристаллах, представляющих собой периодический одномерный массив Au/Ni/Au наноплазмонных антенн.

Актуальность. Кремниевые наноплазмонные антенны получили широкое распространение для приложения к оптическим устройствам способным управлять характеристиками электромагнитной волны, в том числе диаграммой направленности рассеянного оптического излучения, усиливать квантовый выход излучателей, увеличивать магнитооптический и нелинейно-оптический отклики и повышать чувствительность детектирования

изменения физико-химических величин. Такая функциональность возможна благодаря возбуждению локализованных мод Ми и Фабри-Перо в объеме наноантенны. Изучение ближнепольного распределения оптических мод является важной фундаментальной и прикладной задачей для понимания длины волны мод внутри наноантенны и пространственного распределения компонент электрического и магнитного полей. Ранее изучение пространственной структуры оптических мод проводилось для кремниевых наноантенн сферической и цилиндрической форм с помощью ограниченного числа доступных методов. Например, было изучено распределение нормальной компоненты электрического поля электрической квадрупольной моды и анапольных состояний кремниевых наноцилиндров, усиление поля в зазоре кремниевых димеров цилиндрической формы. Однако, изменение формы наноантенн позволяет значительно расширить набор возможных резонансных мод. В связи с этим возникает задача о ближнепольном детектировании распределения электромагнитного поля мод высокого порядка в кремниевых наноантеннах с несферической и нецилиндрической формами.

Упорядоченные 1D и 2D массивы диэлектрических и плазмонных наноантенн, в которых существуют коллективные поверхностные решеточные моды, получили широкое распространение для задач по увеличению магнитооптических и нелинейно-оптических откликов. Например, удастся существенно увеличить магнитооптический отклик в геометриях Керра и Фарадея. В опубликованных ранее работах для этих целей использовали решеточные моды, формирующиеся за счет взаимодействия дипольных мод низшего порядка, локализованных в каждой

плазмонной наноантенне массива. Однако, решеточные моды более высокого порядка не были изучены на предмет усиления магнитооптических эффектов.

Текст диссертационной работы состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит выводы и список литературы. Общий объем работы составляет 196 страниц и включает 87 рисунков и 7 таблиц. Список цитированной литературы насчитывает 182 публикаций.

Первая глава посвящена обзору литературы, который описывает особенности возбуждения электромагнитных мод Ми и Фабри-Перо в единичных диэлектрических и, в частности, в кремниевых наноантеннах с различными формами. Приведена подробная классификация мод Ми, которая использует терминологию мультипольного разложения и подход, используемый для обозначения мод в антеннах микроволнового диапазона. Рассмотрены коллективные решеточные моды в плазмонных кристаллах на основе периодического массива металлических наноантенн и их применение для увеличения магнитооптического отклика. В обзоре присутствует описание методик изучения ближнепольного пространственного разрешения полей оптических мод в металлических и кремниевых наноантеннах с помощью СБОМ и других методов.

Вторая глава диссертационной работы посвящена определению ближнепольного распределения мод Фабри-Перо, существующих в кремниевых наностержнях прямоугольного сечения с длинами от 500 нм до 1100 нм. В начале второй главы моды Фабри-Перо изучались при помощи измерений и численных расчётов спектров экстинкции. В спектрах экстинкции резонансы TM_{11m}^s и TE_{11m}^s мод Фабри-Перо проявлялись как узкие пики, которые расположены внутри спектрально широкого пика, связанного с возбуждением моды Ми. Был проведен расчет электромагнитных полей, в

котором показано, что возбуждаемые TM_{11m}^s и TE_{11m}^s моды Фабри-Перо формируются в результате волноводного распространения TM_{11} и TE_{11} мод по наностержню соответственно. Во второй части второй главы экспериментально изучается ближнепольное распределение TE_{11m}^s и TM_{11m}^s мод Фабри-Перо с помощью методики апертурной СБОМ в режиме на пропускание. Впервые получены СБОМ изображения мод Фабри-Перо в наностержнях на длинах волн от 600 нм до 750 нм с пространственным разрешением около 50 нм. Для численного моделирования особенностей в полученных СБОМ изображениях была создана оригинальная численная модель на основе метода конечных разностей во временной области, которая позволяла восстановить СБОМ изображения. В данной модели моделировались диаграммы направленности локально возбуждаемой наномантенны, определены пространственные положения и длин волны, при которых происходит наиболее эффективного возбуждения мод ближним полем зонда. Показано, что при ТЕ поляризации падающего на зонд света происходит возбуждение TE_{11m}^s мод Фабри-Перо, а при ТМ поляризации – TM_{11m}^s моды. Установлено, что положения наиболее эффективного возбуждения TE_{11m}^s (TM_{11m}^s) мод Фабри-Перо осуществляется в пучностях поперечной компоненты электрического (магнитного) полей указанных мод. Аппроксимация ближнепольных спектров пропускания моделью резонанса Фано подтверждает, что моды TE_{11m}^s и TM_{11m}^s имеют различный сдвиг фазы, относительно излучения, распространяющегося от апертурного зонда. По полученным максимумам и минимумам в СБОМ изображениях наностержней были определены длины волн TE_{11m}^s и TM_{11m}^s моды Фабри-Перо, порядок m , четность ($s=e,o$) относительно плоскости зеркальной симметрии наностержня перпендикулярной его оси. Был рассчитан сдвиг фазы $\varphi_{отр}$, который возникает при отражении от торцов наностержня, и, связанная со

сдвигом фазы, эффективная длина наностержня, отличающаяся от его геометрических размеров из-за проникновения поля за торцы.

Третья глава посвящена изучению ближнепольного распределение оптических мод в кремниевых наномантеннах с формой наноцилиндра, квадратной и треугольной нанопризмы. Ближнепольные распределения оптических мод таких наномантенн детектировались с помощью методов, применённых в предыдущей главе диссертационной работы. Для всех трех нанопризм показано, что СБОМ изображения представляют собой минимумы и максимумы интенсивности, связанные с локальным возбуждением мод. Однако, в отличие от наностержней, обнаруженные особенности связаны не с возбуждением одной моды, существующей на определенной длине волны, а связаны с возбуждением спектрально близких друг к другу мод Ми и Фабри-Перо ТЕ и ТМ типа с разным порядком. С помощью расчетов двумерных карт интегральной локализации поля определяются пространственные и спектральные положения, в которых происходит наиболее эффективное возбуждение мод Ми и Фабри-Перо. В частности, для наноцилиндра показано, что его СБОМ изображение представляет собой суперпозицию отклика, локально возбуждаемой моды Ми с высоким радиальным порядком – электрического диполя третьего порядка (TE_{13}^{eo}) и моды, имеющий высокий мультипольный порядок – электрический гексадекаполь (TE_{41}^{ee}). Показано, что у краев наноцилиндра возможно селективное возбуждение мультипольных мод Ми, имеющих высокий полярный порядок: электрический октуполь (TE_{31}^{eo}), гексадекаполь (TE_{41}^{ee}) и триконтадиполь (TE_{51}^{eo}), возбуждение которых запрещено по симметрии поля для плоской электромагнитной волны при нормальном падении. Для квадратной нанопризмы получены ряд СБОМ изображений на длинах волн от 600 нм до 750 нм. В частности, показано, что

СБОМ изображение связано с локальным возбуждением мод Фабри-Перо с различной пространственной симметрией: $TE_{43}^{\sigma(eo)}$, имеющей симметрию относительно плоскостей зеркальной симметрии, проходящих через центр призмы и $TE_{43}^{d(oe)}$, имеющей зеркальную симметрию относительно диагоналей призмы, а также мод $TM_{24}^{\sigma(oo)}$ и $TM_{15}^{\sigma(ee)}$, возбуждение которых приводит к локальным минимумам на СБОМ изображении. Аналогичным образом СБОМ изображения треугольной нанопризмы представляют собой карты интенсивности рассеяния локально возбуждаемых мод ТМ и ТЕ типа с вкладом излучения зонда. Помимо разности фаз излучения оптической моды и излучения зонда, рассмотренной в предыдущей главе, контраст СБОМ изображений дополнительно определяется эффективностью возбуждения мод и их интенсивностью излучения. Для каждой нанопризмы демонстрируется преимущество локального возбуждения оптических мод ближним полем зонда по сравнению с их возбуждением плоской электромагнитной волной.

В четвертой главе диссертационной работы изучаются особенности в спектрах магнитооптического отклика в геометрии Керра. Изучены магнитоплазмонные кристаллы на основе периодического 1D массива Au/Ni/Au нанопризм в форме нанонитей с трапециевидным сечением. С помощью численного моделирования спектров сечения экстинкции показано, что в единичных нанонитях существуют локализованные плазмоны второго и третьего порядков. Измерение и расчет спектрально-угловой зависимости коэффициента пропускания периодического массива таких нанопризм визуализирует резонансы, связанные с возбуждением решеточных мод второго и третьего порядков. С помощью расчета интегральной локализации электрического поля проведена оценка добротности поверхностных

решеточных мод, показавшая, что добротность моды второго порядка (четной моды) в три раза больше добротности моды третьего порядка (нечетной моды). В работе проведены измерения спектрально-угловой зависимости магнитооптического отклика в геометрии экваториального эффекта Керра. Обнаружено, что возможное резонансное увеличение магнитооптического отклика достигает двух порядков по величине по сравнению с нерезонансной областью спектра. Экспериментальные результаты подтверждаются аналитическими расчетами.

Выводы и положения диссертационной работы сформулированы **обоснованно**. Результаты экспериментальных исследований были получены на современном оборудовании и находятся в согласии с численными и аналитическими расчетами, воспроизводятся в пределах погрешности, что показывает их **достоверность**. Результаты диссертационной работы были опубликованы в 3 статьях (Nano Letters IF=12,709; Nanophotonics IF=8,606; Physical Review B IF=3,808), цитируемых по WoS и Scopus, 1 тезисе конференции, 1 патенте и представлены в 8 докладах на международных конференциях.

Научная новизна диссертационной работы состоит в применении методики апертурной СБОМ в режиме на пропускание для детектирования пространственного распределения оптических мод Ми и Фабри-Перо высокого порядка в наноантеннах. Для объяснения экспериментальных результатов была разработана оригинальная модель для численного моделирования, воспроизводящая экспериментальные СБОМ изображения в кремниевых наноантеннах. Показано, что апертурная СБОМ в режиме на пропускание с использованием источника суперконтинуума может

возбуждать и пространственно разрешать как ТМ-, так и ТЕ-поляризованные моды Ми и Фабри-Перо высокого порядка.

Впервые установлено соответствие особенностей в СБОМ изображениях с пучностями и узлами возбуждаемых оптических мод, пространственные положения которых могут проявляться на СБОМ изображениях как минимумы интенсивности и как максимумы. Данный контраст интенсивности СБОМ изображений определяется интерференцией между излучением оптической моды и излучением, распространяющимся от апертурного зонда. Впервые экспериментально определены длины волн, сдвиг фазы, возникающий при отражении от торцов, и эффективная длина стержней при возбуждении ТЕ и ТМ мод Фабри-Перо. Показано, что возбуждение поверхностных решеточных мод второго порядка приводит к существенному увеличению магнитооптического отклика магнитоплазмонного кристалла на основе периодического массива одномерных Au/Ni/Au нанополостей.

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. **Рис. 29г:** Из текста диссертации не понятно, как получена зависимость для «ближнепольной экстинкции». Из работы 161 очевидно, что эта кривая получена вычитанием расчётной кривой оптической плотности для непрерывной плёнки из аналогичной экспериментальной кривой для наночастицы с тождественной толщиной/высотой (рис. 2, 161).

Вопросы: Справедливо ли считать, что расчетная кривая точно отражает свойства плёнки, которая, как правило, имеет островковую структуру; какую дисперсию использовали авторы для расчёта; при каких условиях сплошная кривая может идти ниже экспериментальной кривой для наночастицы; в чём

заключается физический смысл отрицательной величины «ближнепольной экстинкции»?

2. Автор фокусирует внимание на пространственном распределении полей (компонент полей) внутри резонаторных кремниевых структур, обсуждая различные типы мод Ми и Фабри-Перо. Почему не проводился сравнительный анализ добротности наблюдаемых спектральных особенностей для рассмотренных структур?

3. В рамках проведенного в Главе 4 исследования, имеют ли изучаемые кремниевые структуры «магнитооптическое будущее» и какие представляют наибольший интерес для увеличения магнитооптического отклика?

4. При формировании наноструктур с помощью ФИП возможно возникновение эвтектики, т. е. внедрение ионов в обрабатываемые материалы и смешение этих материалов. Насколько велико влияние такого процесса можно было бы судить из сравнения экспериментальных и расчётных спектров, представленных на рис. 85. Однако шкала интенсивности в относительных единицах неинформативна. Насколько отличались экспериментальные и расчётные спектры? Влиял ли угол расходимости пучка на экспериментальные спектры и анализировался ли этот вопрос с помощью моделирования? Из каких литературных источников использовались дисперсии материалов для расчёта? Проводилось ли исследование дисперсий используемых материалов с помощью эллипсометрии?

5. Для полноты обсуждения в Главе 4 можно было обсудить особенности в оптических и магнитооптических спектра вследствие плазмонного резонанса на границе золото/воздух. Если магнитооптический материал осадить на поверхность изучаемой структуры, следует ли ожидать

увеличение магнитооптического отклика в окрестности 550 нм? Почему в работе выбрана геометрия экваториального эффекта Керра?

6. Существует ли возможность в Lumerical для расчёта магнитооптического отклика?

7. В диссертационной работе есть опечатки, неоднозначные формулировки и неточности. Некоторые примеры:

- «Нормальное падение источника света...»
- В литературном обзоре два рисунка 14.
- Рис. 28: «Нормированное пропускания» измеряется в условных единицах...
- Следует ли читать фразу «Интегрирование величины $|E(x, y)|^2$ осуществлялось по поверхности никелевого слоя.» ...по поверхности сечения никелевого слоя?
- Стр. 66: «Собранный апертурным волоконным зондом сигнал L_x при ориентации поляризатора на выходе волокна вдоль оси x пропорционален как продольной электрической (E_x), так и продольной магнитной (H_y) компоненты поля: $L_x = \alpha E_x + \beta H_y$.»

Вместе с тем, высказанные замечания не влияют на общую высокую оценку и значимость диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту 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 приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Фролов Александр Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
начальник оптической лаборатории,
Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики имени Н. Л. Духова,
Барышев Александр Валерьевич

«11» апреля 2023 г.

Контактные данные:
телефон: 8(499)972-8499 доп. 7406, e-mail: baryshev@vniia.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.07 – Физика конденсированного состояния вещества

Адрес места работы: 127030, Москва, Сущевская ул., д.22

Контактные данные:
Тел.: +7 (499) 503-8102; e-mail: baryshev@vniia.ru

Подпись Барышева Александра Валерьевича УДОСТОВЕРЯЮ:

Учёный секретарь специального дисс. совета на базе ФГУП «ВНИИА»

Д 74.1.002.02, к.т.н.

Л.В. Феоктистова

«11» апреля 2023 г.