

## **ОТЗЫВ**

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

**Фролова Александра Юрьевича**

**на тему: «Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия  
кремниевых наноантенн и магнитооптическая спектроскопия**

**плазмонных наноантенн»**

**по специальности 1.3.19 – «лазерная физика»**

Диссертационная работа А.Ю. Фролова посвящена определению ближнепольного распределения оптических мод Ми и Фабри-Перо высокого порядка в кремниевых наноантеннах с формой стержня и призм с круглым, квадратным и треугольным основаниями при помощи апертурной сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Также работа посвящена изучению магнитоиндуцированной модуляции света при возбуждении поверхностных решеточных плазмонных мод второго и третьего порядка в магнитоплазмонных кристаллах, состоящих из периодического одномерного массива Au/Ni/Au наноантенн.

Актуальность работы обусловлена современными задачами нанофотоники по пространственному разрешению оптических мод, локализованных в субдифракционном пространственном объеме кремниевых наноантенн. Кремниевые наноантенны обладают малыми оптическими потерями и большой диэлектрической проницаемостью (порядка 12), что делает их весьма привлекательными в сравнении с металлическими наноантеннами. Ранее изучение пространственной структуры оптических мод в диэлектрических и кремниевых наноантеннах сводилось преимущественно к сферической и цилиндрической формам: было получено распределение нормальной

компоненты электрического поля электрической квадрупольной моды и анапольных состояний кремниевых наноцилиндров, усиление поля в зазоре кремниевых димеров цилиндрической формы. Изменение формы наноантенн позволяет менять пространственную структуру оптических мод. В связи с этим возникает задача о ближнепольном детектировании распределения электромагнитного поля оптических мод высокого порядка в кремниевых наноантеннах различных несферических и нецилиндрических форм, что и было выполнено в диссертационной работе А.Ю. Фролова. Кроме единичных наноантенн, поддерживающих моды высокого порядка, значительный интерес в нанофотонике представляют периодически упорядоченные диэлектрические и плазмонные наноантенны, в которых существуют коллективные поверхностные фотонно-кристаллические моды. Их меньшие радиационные потери позволяют значительно увеличить их функциональность и, в частности, усиливать магнитооптические эффекты Керра и Фарадея, которые проявляются в изменении интенсивности, поляризации и фазы электромагнитного излучения. Для этих целей ранее использовали фотонно-кристаллические моды, формирующиеся как за счет дифракционного связывании фундаментальных электрически дипольных мод низшего порядка, существующих в каждой плазмонной наночастице массива, так и образование плазмон-волноводных коллективных мод (за счет сильной связи между локализованными плазмонными модами и волноводными модами, в случае наличия волноводных слоев на подстилающей подложке). В работе А.Ю. Фролова рассмотрено усиление магнитооптических эффектов при возбуждении поверхностных решеточных мод высокого порядка с четной и нечетной симметрией электромагнитного поля, которые имеют большую добротность по сравнению с модами низших порядков.

Текст диссертационной работы состоит из введения, четырех глав, заключения, содержащее выводы и списка литературы. Общий объем работы составляет 196 страницы; работа содержит 87 рисунков и 7 таблиц. Список литературы насчитывает 182 наименования.

В первой главе приведен обзор литературы, описывающий электромагнитные моды Ми и Фабри-Перо, существующие в диэлектрических и, в частности, в кремниевых наноантеннах с различными формами, а также поверхностным решеточным плазмонным модам в плазмонных кристаллах на основе периодического массива металлических наноантенн. Описаны методы субдифракционного пространственного разрешения электромагнитных полей оптических мод в металлических и кремниевых наноантеннах, включающие апертурную и безапертурную сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию (СБОМ) и другие. Часть обзора посвящена усилению магнитооптических эффектов Керра и Фарадея при помощи возбуждения поверхностных решеточных мод в периодических массивах наноантенн.

Вторая глава диссертационной работы посвящена экспериментальному и численному изучению мод Фабри-Перо, существующих в кремниевых наностержнях прямоугольного сечения с длинами от 500 нм до 1100 нм. В первой части второй главы были измерены и численно рассчитаны спектры экстинкции кремниевых наностержней и показано, что возбуждение  $TM_{11m}^s$  и  $TE_{11m}^s$  мод Фабри-Перо приводит к узким пикам на спектрах экстинкции, которые расположены внутри спектрально широкого пика, связанного с возбуждением моды Ми. Расчет электромагнитных полей установил, что моды Фабри-Перо  $TM_{11m}^s$  и  $TE_{11m}^s$  формируются в результате волноводного распространения света по наностержню. Вторая часть второй главы посвящена экспериментальному определению ближнепольного распределения  $TE_{11m}^s$  и  $TM_{11m}^s$  мод Фабри-Перо при помощи апертурной

сканирующей ближнепольной оптической микроскопии в режиме на пропускание. Данная методика позволяет локально возбуждать моды Фабри-Перо за счет их пространственного перекрытия с ближнепольными компонентами, локализованными около субволнового отверстия апертурного зонда. Впервые получены ближнепольные изображения мод Фабри-Перо в наностержнях с длинами от 500 нм до 1100 нм. Существенная часть работы посвящена численному анализу экспериментальных ближнепольных изображений. Была создана численная модель на основе метода конечных разностей во временной области (Ansys Lumerical FDTD), воспроизводящая полученные ближнепольные изображения. Показано, что расчет ближнепольных изображений находится в хорошем согласии с экспериментальными данными по числу и относительной интенсивности максимумов и минимумов.

Третья глава диссертационной работы посвящена экспериментальному и численному определению ближнепольного распределения оптических мод в кремниевых наноантеннах с большей степенью вращательной симметрии: нанопризма (C<sub>∞</sub>), квадратная (C<sub>4</sub>) и треугольная (C<sub>3</sub>) нанопризмы. Для определения ближнепольных распределений оптических мод таких наноантенн используются методы и подходы, аналогичные примененным во второй главе. В отличие от ближнепольных изображений кремниевых наностержней для всех трех изучаемых нанопризм показано, что минимумы и максимумы интенсивности изображений связаны с излучением разных по порядку и симметрии локально возбуждаемых мод Ми и Фабри-Перо ТЕ и ТМ типа, которые спектрально и пространственно перекрыты друг с другом. Помимо разности фаз излучения оптической моды и излучения зонда, рассмотренной в предыдущей главе, контраст ближнепольных изображений также определяется эффективностью возбуждения мод и их интенсивностью

излучения. Для выявления положений зонда, в которых происходит наиболее эффективное возбуждение мод, была рассчитана интегральная локализация электрического поля при каждом положении зонда на наноантенне. Полученные максимумы сопоставлялись с особенностями интенсивности на ближнепольных изображениях, в которых далее определялся тип возбуждаемых мод. Аналогично результатам предыдущей главы показано, что положения наиболее эффективного возбуждения мод расположены в узлах нормальной компоненты магнитного и электрического полей TE и TM мод соответственно. Для всех трех форм нанопризм показано, что зонд возбуждает моды с симметрией электромагнитного поля, которые не могут быть возбуждены плоской электромагнитной волной при падении нормальном.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена экспериментальному и численному изучению экваториального магнитооптического эффекта Керра при возбуждения поверхностных решеточных мод второго и третьего порядков в магнитоплазмонных кристаллах на основе периодического массива Au/Ni/Au наноантенн с трапециевидным сечением. В работе приведен анализ локализованных плазмонных мод второго и третьего порядков, существующих в единичной Au/Ni/Au нанонити. Показано, что упорядочивание наноантенн в одномерный периодический массив приводит к формированию поверхностных решеточных моды второго и третьего порядка при спектральном перекрытии локализованных плазмонов с аномалией Релея. Добротность поверхностной решеточной моды второго порядка превосходит в три раза добротность моды третьего порядка. Большая добротность моды второго порядка связана с ее меньшими радиационными потерями по сравнению с модой третьего порядка, имеющей нечетную симметрию. Измерения магнитоиндуцированной модуляции коэффициента пропускания (экваториального магнитооптического

эффекта Керра) показали, что при возбуждении обеих поверхностных решеточных мод происходит усиление эффекта Керра по сравнению с нерезонансной областью спектра: 135-кратное усиление для моды второго порядка и 65-кратное для моды третьего порядка. Однако, усиление эффекта Керра, обусловленное возбуждением моды второго порядка с четной зеркальной симметрией, в два раза превосходит усиление при возбуждении моды третьего порядка. Результаты измерений спектров ЭМОЭК подтверждаются расчетами, в которых использовалась модель резонансов Фано, учитывающая сдвиг резонансной длины волны поверхностных решеточных мод за счет приложения магнитного поля.

Выводы и положения, сформулированные в работе, обоснованы. Результаты экспериментальных исследований были получены на современном оборудовании и находятся в согласии с расчетами, поэтому результаты являются достоверными. Результаты диссертации были опубликованы в 3-х статьях (Nano Letters, Nanophotonics, Physical Review B), цитируемых по WoS и Scopus, 1 тезисе конференции, 1 патенте и представлены в 8 докладах на международных конференциях.

В рамках диссертации получены результаты, обладающие научной новизной. Впервые были получены ближнепольные изображения кремниевых наностержней и нанопризм с квадратным и треугольным основаниями. Разработана численная модель позволяющая воспроизводить экспериментальные ближнепольные изображения в кремниевых наноантеннах. Показано, что апертурная сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия 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 с четной и нечетной зеркальной и вращательной симметрией, в том числе те,

которые не возбуждаются плоской электромагнитной волной при нормальном падении. Впервые установлено соответствие особенностей на СБОМ изображениях с пучностями и узлами возбуждаемых оптических мод, пространственные положения которых могут проявляться на ближнепольных изображениях как минимумы интенсивности и как максимумы. 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 большему усилению экваториального магнитооптического эффекта Керра по сравнению с модой третьего порядка в магнитоплазмонном фотонном кристалле на основе периодического массива одномерных Au/Ni/Au наностержней.

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Проведенные в Главе 2 расчеты спектров экстинкции массивов кремниевых наностержней не учитывают возможное влияние дифракции, поскольку период структуры, 3 мкм, превосходит длину волны излучения во всем измеряемом диапазоне (0.4-0.9 мкм). Следовало хотя бы оценить возможную величину погрешности из-за неучета дифракции.

2. Кстати, при сравнении экспериментальных результатов для спектров экстинкции массивов кремниевых наностержней с расчетными, с одной стороны, используется не общепринятое определение экстинкции как  $1-T$ , а не  $-\ln T$  (где  $T$  - коэффициент пропускания), см. на рис. 40 а,б диссертации, а также удельное расчетное значение сечения экстинкции (размерное) вместо безразмерной экстинкции, см. на рис. 40 в,г. Конечно, поскольку в рассматриваемом случае  $T$  близко к единице, разница невелика. Но следовало хотя бы расчетные величины привести к аналогичным измеряемым, для

возможности проведения количественного, а не только качественного сравнения.

3. Для лучшего понимания векторного характера распределения ближнего поля резонансных мод на рис. 54, 59-61, следовало бы, на мой взгляд, хотя бы указать относительный вклад  $x$ - и  $y$ -компонент электрического поля (которые на соответствующих панелях показаны в нормированных на свои максимумы одинаковых цветовых шкалах).

4. Проведенные в 4 главе исследования резонансного усиления экваториального магнитооптического эффекта Керра в магнитоплазмонном фотонно-кристаллическом слое в виде периодического массива одномерных Au/Ni/Au наноантенн на сапфире ограничились случаем однородной подложки, не поддерживающей волноводных мод. На мой взгляд, было бы интересно исследовать случай с более сложной подложкой, содержащей поверхностный диэлектрический волновод – когда можно ожидать существенного усиления рассматриваемых эффектов за счет образования плазмон-волноводных поляритонов.

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 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,  
профессор, член-корреспондент РАН,  
профессор кафедры общей физики  
и физики конденсированного состояния  
вещества физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
Тиходеев Сергей Григорьевич

«12» апреля 2023 г.

Контактные данные:  
тел.: +7 (499) 503-8102, e-mail:  
Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:  
01.04.07 – Физика конденсированного состояния вещества

Адрес места работы: 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы,  
д. 1

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

Подпись Тиходеева Сергея Григорьевича УДОСТОВЕРЯЮ:  
Ученый секретарь Ученого совета  
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

Доктор физико-математических  
наук, профессор  
\_\_\_\_\_  
В.А. Караваев  
« \_\_\_\_ » апреля 2023 г.