

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Колмычек Ирины Алексеевны «Линейные и нелинейные
оптические эффекты в наноструктурах и тонких магнитных пленках»,
представленной на соискание учёной степени доктора
физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа И.А. Колмычек посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия оптического излучения с субволновыми структурами. Представленные результаты продолжают и дополняют классические работы отечественных и зарубежных авторов по изучению оптических и нелинейно-оптических эффектов в нанобъектах. Диссертационная работа включает пионерские и основополагающие результаты по оптике метаматериалов и метаповерхностей. Современный интерес к данной тематике обусловлен, с одной стороны, возможностью исследования широкого класса эффектов, ненаблюдаемых в структурах большего размера, а с другой стороны, перспективами использования наноматериалов в устройствах фотоники для управления параметрами света. При этом современные достижения мировой и отечественной науки и техники позволяют изготавливать наноструктуры различной формы с характерным размером порядка десятков нанометров, а вычислительные мощности позволяют рассчитывать распределения оптического поля в таких объектах. Таким образом, актуальность выполненных соискателем исследований не вызывает сомнений.

В диссертационной работе предложен комплексный подход к исследованию оптических свойств наноматериалов, сочетающий методы как микроскопии, так и оптической, и магнитооптической спектроскопии. Основная часть работы посвящена нелинейно-оптическим эффектам в исследуемых структурах при воздействии на них лазерного излучения – генерации второй гармоники и магнитному нелинейно-оптическому эффекту Керра. Дело в том, что резонансные и магнитоиндуцированные эффекты в отклике на удвоенной частоте, как правило, на порядки превосходят свои аналоги на основной частоте. Кроме того, в диссертационной работе рассмотрены возможности диагностики интерфейсов и наноструктур методами нелинейной оптики.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем работы составляет 293 страницы и включает в себя 104 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 298 библиографических ссылок.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации диссертационной работы.

Первая глава носит обзорный характер, в ней приведены основные сведения о нелинейно-оптических эффектах и методиках их исследования. Кроме того, приведен обзор литературы о базовых аспектах взаимодействия света с металлическими наноструктурами, в частности, возбуждении плазмонных резонансов различной природы и их влиянии на оптический отклик исследуемых метаповерхностей и метаматериалов. Рассмотрены основные эффекты при взаимодействии хиральных структур с электромагнитным излучением и указаны результаты исследований, уже проведенных другими научными группами в данной области. Приведено определение и описаны основные свойства гиперболических метаматериалов на основе благородных металлов и диэлектриков. В конце первой главы представлены схемы экспериментальных установок и подробно описаны методики, применяемые в работе.

Во **второй главе** диссертации автор представляет результаты исследования магнитооптического отклика тонких пленок на основе ферромагнитных металлов. Хорошо известно, что наличие статической намагниченности в структуре может модифицировать интенсивность, фазу и поляризацию оптического отклика как на частоте накачки, так и на частоте второй гармоники. При этом источники линейного оптического отклика локализованы в «объеме» магнетика, поэтому магнитооптические методы зачастую используются для исследования магнитных свойств материалов и сплавов. Согласно симметрии тензора квадратичной восприимчивости, формирование отклика второй гармоники происходит на поверхностях и интерфейсах, поэтому с помощью метода магнитного нелинейно-оптического эффекта Керра возможна диагностика магнитных состояний на границах раздела различных ферромагнитных металлов с парамагнетиками. В диссертационной работе развиты методы визуализации анизотропии магнитных свойств пленок субволновой толщины, обменного взаимодействия магнитных слоев, разделенных диэлектриком, и нетривиальных состояний намагниченности на границе ферромагнитного и тяжелого металлов.

В **третьей главе** обсуждаются нерезонансные ферромагнитные наноструктуры двух типов. Первый раздел посвящен изучению магнитоиндуцированной второй гармоники в массивах кобальтовых наночастиц треугольной формы. Согласно расчетам и данным магнитно-силовой микроскопии, в частицах возникает вихревое состояние остаточной

намагниченности после приложения насыщающего магнитного поля. В случае, когда во всех частицах вихри направлены в одну и ту же сторону, в структуре есть ненулевой макроскопический тороидный момент, наблюдение которого затруднительно методами линейной магнитооптики. В диссертации разработан метод визуализации тороидного момента метаповерхности с помощью магнитоиндуцированной второй гармоники.

Во втором разделе представлены результаты комплексного исследования наноперфорированных пленок пермаллоя. Методами линейной и нелинейной магнитооптики, а также с помощью расчетов продемонстрирована анизотропия магнитных свойств изучаемой структуры.

Четвертая глава посвящена металлическим плазмонным структурам и формированию в них резонансного оптического отклика. В зависимости от дизайна метаповерхностей, в них возбуждаются локальные поверхностные плазмоны, бегущие плазмон-поляритоны или решеточные плазмонные моды. При возбуждении всех указанных резонансов обнаружено увеличение интенсивности генерации второй гармоники и усиление магнитооптических эффектов в геометрии Керра и Фохта. Кроме того, в гетероструктурах на основе опала, покрытого пленкой кобальта, обнаружены эффекты аномального пропускания, которое в сочетании с сильной магнитооптической активностью перспективно для возможных приложений в функциональных элементах управления светом.

В последнем разделе главы предложен дизайн композитной структуры, где возбуждается резонанс магнитного локального оптического поля. В соответствующем спектральном диапазоне также наблюдается усиление эффективности генерации второй гармоники.

В **пятой главе** представлены результаты экспериментального исследования хиральных планарных структур. Показано, что циркулярный дихроизм в квадратичном оптическом отклике определяется как формой хиральных элементов, так и азимутальной ориентацией структуры относительно плоскости поляризации регистрируемого сигнала и плоскости падения лазерного излучения. Особенно интересен раздел, посвященный квазидвумерным метаповерхностям, которые представляют собой массивы винтообразных наноотверстий в серебряной пленке субволновой толщины. В таких структурах наблюдается как аномальное пропускание, так и большие значения циркулярного дихроизма в линейном и нелинейном отклике, что также важно для задач управления параметрами света.

В четвертом разделе главы впервые продемонстрировано наблюдение циркулярного дихроизма второй гармоники, наведенного внешним магнитным полем в зеркально-симметричной метаповерхности.

Шестая глава посвящена исследованию гиперболических метаматериалов на основе массивов металлических наностержней в диэлектрической матрице. Гиперболический закон дисперсии в сочетании с плазмонными свойствами таких структур обеспечивают наблюдение ряда интересных оптических эффектов в них – гигантского двулучепреломления, усиления генерации второй гармоники и магнитооптического отклика. Приведенные результаты интересны как с фундаментальной точки зрения - наблюдение взаимодействия электромагнитного излучения с подобным классом метаматериалов, так и с прикладной - для создания сверхтонких полуволновых и четвертьволновых пластинок.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

К основным результатам работы можно, в первую очередь, отнести следующие:

- 1) Впервые исследованы эффекты анизотропии и хиральности метаповерхностей в формировании их квадратичного нелинейно-оптического отклика.
- 2) Экспериментально продемонстрировано, что намагниченность структурно изотропных ферромагнитных пленок приводит к возникновению анизотропии интенсивности второй гармоники.
- 3) На основе генерации магнитоиндуцированной второй гармоники развиты нелинейно-оптические методы визуализации тороидного момента намагниченности, нетривиальных магнитных состояний, анизотропии магнитных свойств и низкодобротных плазмонных резонансов в субволновых наноструктурах.
- 4) Впервые экспериментально продемонстрировано аномальное двулучепреломление, а также усиление магнитооптического и нелинейнооптического отклика гиперболических метаматериалов в спектральной окрестности особых дисперсионных точек.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, написана грамотным языком, хорошо структурирована, прошла апробацию на российских и международных конференциях. Важно отметить большой объем проведенных сложных экспериментальных исследований. Все полученные данные

проанализированы, интерпретированы и, где это необходимо, сопоставлены с результатами расчетов. Результаты опубликованы в ведущих научных журналах.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертационной работы.

Вместе с тем, при общей высокой оценке, к диссертации имеются некоторые замечания:

1. В параграфе 4.4 представлены результаты исследования нелинейно-оптического отклика структур при возбуждении резонанса локального магнитного поля. При этом в обзоре литературы отсутствуют ссылки на работы других научных групп по данной тематике, поэтому остается непонятной новизна проведенных исследований.
2. В параграфе 5.4 описана генерация второй гармоники в массивах пермаллоевых наноструктур на кремниевой подложке. На мой взгляд, выбор для материала подложки кристаллического кремния с той же симметрией, что и массив наноструктур, неудачен, так как сложно разделить вклад подложки и метаповерхности в квадратичный нелинейно-оптический отклик.
3. В параграфе 6.4 представлены частотно-угловые спектры интенсивности второй гармоники для гиперболических метаматериалов. При этом максимум сигнала на экспериментальных спектрах наблюдается при угле падения 15-20 градусов, а на рассчитанных – при угле падения 5-10 градусов. В диссертационной работе не объяснено, с чем связаны такие различия.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общее впечатление от диссертации. Результаты, представленные в диссертационной работе, имеют большую практическую ценность и вносят существенный вклад в разработку фундаментальных и прикладных принципов оптики и нелинейной оптики наноструктур.

Диссертация «Линейные и нелинейные оптические эффекты в наноструктурах и тонких магнитных пленках» соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» и требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор — Колмычек Ирина

Алексеевна — заслуживает присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры наноэлектроники, заместитель директора Института перспективных технологий и индустриального программирования МИРЭА — Российского технологического университета

Юрасов Алексей Николаевич

119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

Телефон: +7 (499) 215-65-65, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru