



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий,
механики и оптики» (Университет ИТМО)

Кронверкский проспект, д. 49, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация, 197101
тел.: (812) 232-97-04 | факс: (812) 232-23-07
od@mail.ifmo.ru | www.ifmo.ru

07.06.2018 № 22.11/14

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Университета ИТМО
д.т.н., профессор



50 В.О. Никифоров

«07» июня 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Кондратова Алексея Владимировича

«Взаимодействие света с метаматериалами с отрицательным показателем преломления и экстремальной оптической хиральностью»,

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа Кондратова А.В. посвящена изучению взаимодействия света с оптическими метаматериалами. В рамках этого направления в работе решается достаточно разнообразный набор задач, связанных с отрицательно преломляющими метаматериалами и наноструктурами с искусственной хиральностью.

В Главе 1 приведён подробный обзор существующих работ в исследуемой области.

Глава 2 посвящена макроскопической теории давления света. Автор показывает, что построение макроскопических выражений для тензора напряжений и силы Лоренца по прямой аналогии с микроскопическими

может привести к абсурдным результатам и возникновению «виртуальных сил» в отсутствие реального взаимодействия. Однако далее автор показывает, что, несмотря на невозможность усреднения микроскопических выражений, всё же можно построить непротиворечивое макроскопическое описание давления, универсальное для обычных и отрицательно преломляющих сред.

В Главе 3 исследуется явление экстремальной оптической хиральности в плазмонных наноструктурах сложной формы. Здесь, с помощью численного FDTD моделирования и модифицированной теории связанных мод автор показывает, что достижение экстремальных значений оптической активности и кругового дихроизма становится возможным благодаря резонансу пропускания типа Фано, но с хиральным расщеплением.

В Главе 4 подробно исследована чувствительность плазмонных массивов наноотверстий к диэлектрическому окружению и присутствию слоя с естественной молекулярной оптической активностью.

Глава 5 посвящена описанию метода обработки данных АСМ, полученных как прямым, так и наклонным зондами, и построению усреднённой трёхмерной модели элементарной ячейки реальной структуры, пригодной для дальнейшего численного моделирования.

Актуальность темы диссертации

Быстрый прогресс и развитие оптических метаматериалов позволяют добиваться эффектов, невозможных при использовании традиционных материалов. Так, метаматериалы с отрицательным показателем преломления, являвшиеся ранее лишь теоретической абстракцией, реализуются сначала для радио, а затем для инфракрасного и видимого диапазонов. В то же время наноструктуры с искусственной хиральностью позволяют достичь вращения плоскости поляризации на 180° при толщине структуры порядка 200-300 нм.

Подобные и многие другие эффекты требуют новой теории и понимания физических механизмов для эффективного использования при решении различных прикладных задач и создания новых наноустройств.

Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна

В итоге выполнения диссертационного исследования автором впервые получены следующие результаты:

1. Сформулирован подход, обеспечивающий физически непротиворечивое макроскопическое описание взаимодействия света и среды с учётом частотной дисперсии и универсальный для обычных и отрицательно преломляющих сред. Наглядно показана фундаментальная связь между всеми основными величинами теории: плотностями импульса и потока импульса, групповой скоростью, макроскопической силой, плотностью энергии электромагнитной волны.
2. Разработан новый метод обработки экспериментальных данных, полученных с помощью прямого и наклонного зондов АСМ, позволяющий построить усреднённую модель элементарной ячейки реальной структуры, содержащую все её периодические особенности, но лишённую случайных дефектов и искажений. Такая модель позволяет производить численное моделирование с периодическими граничными условиями максимально приближенное к реальному образцу.
3. Построена модифицированная теория связанных мод, учитывающая возбуждение двух плазмонов на разных длинах волн и разные константы связи между этими плазмонами и падающими и исходящими плоскими волнами левой и правой круговой поляризации. На основании представленной теории показано, что экстремальная оптическая хиральность плазмонных массивов наноотверстий сложной формы является следствием интерференции двух каналов

пропускания: слабого ахирального фонового и резонансного хирального.

4. Вычислено, что изменение показателя преломления в тонком приповерхностном слое массива 2D-хиральных отверстий в серебре всего на 1% приводит к возникновению наблюдаемых современными методами значений оптической активности и кругового дихроизма. На основании такой высокой чувствительности к диэлектрическому окружению автором предложен механизм нарушения зеркальной симметрии за счёт нелинейности при погружении 2D-хиральной структуры в симметричное окружение с нелинейностью Керра и асимметричного возбуждения плазмонных резонансов структуры.
5. Показано, что массивы круговых наноотверстий в серебре позволяют усилить естественную оптическую активность тонкого слоя гиротропной среды на порядок за счёт возбуждения плазмонного резонанса отверстий. При этом автор впервые исследует как простые цилиндрические, так и отверстия сложной трёхмерной формы, и делает вывод, что ахиральная форма цилиндрических отверстий оказывается преимуществом для задачи детектирования молекулярной оптической активности, так как в этом случае резонансное усиление оптической хиральности происходит на нулевом фоне, в то время как отверстия сложной формы обладают сильной собственной оптической хиральностью.

Степень обоснованности научных положений, результатов и выводов

Достоверность и обоснованность полученных в работе данных определяется корректной постановкой физической задачи и использованием современных вычислительных методов. Достоверность использованных в работе численных алгоритмов подтверждается хорошим согласием, как с экспериментальными данными, так и с результатами аналитической модели связанных мод, что также подтверждает и достоверность окончательных

выводов. Все представленные результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Практическая значимость полученных автором результатов

Построенное макроскопическое описание взаимодействия света и среды может быть использовано для решения ряда прикладных задач в области оптомеханики.

Предложенный метод обработки данных АСМ, полученных с использованием как прямых, так и наклонных зондов, не ограничивается исследованием только массивов плазмонных нанодоверстий, а применим для исследования широкого класса периодических наноструктур сложной формы и с большим аспектным отношением.

Обнаруженные с помощью численного моделирования высокая чувствительность плазмонных массивов 2D-хиральных отверстий к асимметрии диэлектрического окружения и плазмонное усиление молекулярной оптической активности круговыми нанодоверстиями имеют важное прикладное значение при разработке новых устройств для оптической диагностики и детектирования молекулярной хиральности.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации результаты представляют интерес для специалистов, работающих в области нанопотоники, метаматериалов и физики конденсированного состояния. Результаты исследования могут быть использованы при подготовке студентов по направлениям «Физика конденсированного состояния», «Физика».

Оформление диссертации, публикации и апробация

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 92 страницы, включая 29 рисунков. Список

использованной литературы содержит 111 библиографических наименований. Работа написана логичным, доступным для понимания языком. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ.

По теме диссертационной работы опубликовано 4 статьи в журналах, индексируемых международными базами (Web of Science, Scopus) и рекомендованных ВАК.

Основные результаты диссертационной работы также докладывались на 5 профильных международных конференциях и опубликованы в сборниках тезисов, на 3-х из которых были лично представлены автором в виде устных докладов: Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2015, Прага, Чехия; The 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials) 2015, Оксфорд, Великобритания; Annual International Conference Days on Diffraction 2016, Санкт-Петербург, Россия.

Замечания по диссертации

1. Задача вычисления давления света в среде с отрицательным показателем преломления решена с учётом только частотной дисперсии, хотя многие оптические метаматериалы и фотонные кристаллы обладают также и сильной пространственной дисперсией;
2. Так как численное моделирование экстремальной оптической хиральности и метод обработки данных АСМ существенно разнесены по главам 3 и 5, становится трудно понять и сравнить, насколько точное восстановление топографии поверхности реальной структуры помогло при численном моделировании и воспроизведении экспериментальных данных;

Заключение

Диссертационная работа Кондратова А.В. является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты, относящиеся к исследованию экстремальной оптической хиральности в плазмонных наноструктурах и давления света в средах с отрицательным показателем преломления.

Работа имеет большое практическое значение для исследования широкого класса периодических плазмонных наноструктур со сложной топографией поверхности — отверстиями и щелями с большим аспектным отношением, вертикальными стенками и наноразмерными деталями формы.

Полученные в работе результаты и выводы являются достоверными и обоснованными. Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки представленной работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Тематика выполненных Кондратовым А.В. исследований соответствует паспорту специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.
3. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

Диссертационная работы Кондратова А.В. по форме и содержанию соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным п.п. 9-14 Положения о

присуждении ученых степеней №842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 28.08.2017 г.). Автор диссертации Кондратов А.В. заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв составлен и обсуждён на основании знакомства с текстом диссертации, авторефератом и докладом Кондратова А.В. на заседании кафедры Нанопотоники и метаматериалов Физико-технического факультета.

Отзыв принят на заседании кафедры Нанопотоники и Метаматериалов Физико-технического Факультета, протокол № 5 от «26» апреля 2018 г.

Председательствующий

доктор физ.-мат. наук, кафедра НиМ, главный научный сотрудник

Белов П.А.

Подпись лица, составившего отзыв

кандидат физ.-мат. наук, кафедра НиМ, научный сотрудник

Богданов А.А.

06.06.2018

199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия В.О., д. 14

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Кафедра нанопотоники и метаматериалов

тел: +7 (812) 457-18-46; e-mail: nm@corp.ifmo.ru