

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ФНИЦ «Кристаллография и
фотоника» РАН

к.ф.-м.н.

О.А. Алексеева

«25» ноября 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Оспановой Анар
«Электродинамические эффекты в метаматериалах с тороидным откликом»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.07 – физика
конденсированного состояния

Диссертация Анар Оспановой направлена на разработку метаповерхностей с сильным тороидным откликом и, в частности, выяснения условий, необходимых для появления в них неизлучающих и слабоизлучающих состояний. Известные на данный момент подходы к созданию таких структур для СВЧ диапазона не универсальны, а приводимые в литературе конструкции трудно реализуемы на субмикрометровых масштабах, необходимых в оптике. Автором указано на возможное решение сложной проблемы получения оптических тороидных метаматериалов за счет использования диэлектрических структур относительно простой формы и продемонстрировано выполнение в них условий существования неизлучающих состояний. В работе развиты методы анализа мультипольного отклика метаматериалов и предложены модельные конструкции терагерцевых и оптических тороидных метаматериалов. Справедливость многих важных выводов подтверждена экспериментально.

Диссертация состоит из трех глав. Глава 1 содержит обзор современного состояния электродинамики метаматериалов и, в том числе, известных реализаций структур с сильным тороидным откликом. В Главе 2 подробно описаны используемые автором методы теоретических и экспериментальных исследований. Глава 3 представляет результаты проведенных исследований, а ее подразделы описывают решение ряда действительно интересных задач. Так, в разделе 3.1 развит теоретический метод эквивалентных источников, позволяющий найти общие условия возникновения анапольных (неизлучающих) состояний токов и полей в метачастицах за счет компенсации дипольного и тороидного излучения. В качестве любопытной иллюстрации метода в разделе 3.2 рассмотрена возможность пассивной электромагнитной маскировки металлического

дипольного рассеивателя за счет дополнения его специальным окружением из диэлектрических цилиндров с сильной тороидной компонентой. Далее в разделе 3.3 проведен дизайн модельного метаматериала на основе цилиндров из танталата лития (диэлектрика с высоким показателем преломления). Продемонстрирована возможность конструирования высокодобротного резонанса пропускания в терагерцевом диапазоне за счет принципа компенсации излучения основных мультиполей системы, в том числе дипольного и тороидного излучения. В разделе 3.4 предложена относительно простая и реализуемая конструкция оптического анапольного метаматериала на основе тонкой кремниевой пластины, перфорированной цилиндрическими наноотверстиями. Приведенные в разделе 3.5 экспериментальные результаты подтверждают наличие тороидного состояния *in situ* внутри метамолекул на основе цилиндрических объемов, заполненных водой.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа посвящена интересной и актуальной тематике исследования диэлектрических метаматериалов и физических явлений, сопровождающих появление в них тороидного электромагнитного отклика. Область метаматериалов в целом привлекает большое внимание в настоящий момент, в том числе, благодаря перспективам практической реализации ряда уникальных эффектов, таких как отрицательное преломление, субдифракционная фокусировка, сильная локализация полей в субволновых областях и оптические резонансы сверхвысокой добротности. В то время как для работы в радио и СВЧ диапазонах метаматериалы могут быть сконструированы из металлических включений сложной формы, при переходе к терагерцевому и оптическому диапазонам металлические компоненты становятся невыгодны из-за высокого уровня потерь на поглощение. В этой связи довольно остро стоит вопрос о разработке диэлектрических метаматериалов и метаповерхностей на основе частиц и структур нано- и микрометрового масштаба из прозрачных материалов с высоким показателем преломления.

Научная значимость и новизна результатов

Основная теоретическая новизна работы состоит в формулировке и применении метода эквивалентных источников, который может быть использован как универсальный инструмент для проектирования анапольных состояний в метаматериалах с тороидным откликом различной природы. Помимо этого, существенной новизной обладают и предлагаемые автором конструкции метаматериалов для терагерцевого и оптического диапазонов. Важным достоинством работы является то, что автор умело сочетает анализ общих закономерностей электромагнитного отклика произвольных систем с проведением прямого численного решения уравнений электродинамики для довольно непростых структур, а затем приводит и экспериментальные результаты, позволяющие проиллюстрировать и подтвердить ряд важных выводов.

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 с результатами аналитической теории, а также во многом и с данными измерений в модельном эксперименте. Все представленные результаты опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях. Положения, выносимые на защиту, обоснованы и точно соответствуют основным результатам работы.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость работы заключается в предложении путей практической реализации метаматериалов с тороидным откликом, что особенно актуально для оптического диапазона, где это требует изготовления частиц и структур нанометровых масштабов. В частности, автором предложена конфигурация метаматериалов на основе перфорированных диэлектрических пленок, что доступно для метода литографии сфокусированным ионным пучком. В более общем контексте, обсуждаемое в работе повышение добротности электромагнитных резонансов в метаматериалах за счет интерференционного гашения излучения основных мультиполей перспективно для реализации устройств замедления света, создания высокочувствительных сенсоров и концентраторов полей. Предлагаемый метод мультипольной маскировки может найти применение при создании сенсоров неинвазивной диагностики плазмы. Таким образом, данная работа практически важна для создания новых материалов и устройств оптики и оптоэлектроники.

Оформление диссертации, публикации и апробация

Диссертация состоит из введения, трех основных глав и выводов. Полный объем диссертации составляет 128 страниц, включая 51 рисунок. Список использованной литературы содержит 293 библиографических наименования. Работа написана логичным и доступным для понимания языком. По результатам работы автором опубликовано 9 публикаций, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемые в базе данных «Сеть науки» (Web of Science). Изложенные в работе результаты прошли апробацию на 5 международных конференциях.

Замечания по диссертации

1. Не представляется оптимальной выбранная автором структура диссертации. Описание всех используемых теоретических и экспериментальных методов выделено в отдельную Главу 2, тогда как основное содержательное описание применения этих методов приведено в Главе 3. Это затрудняет последовательное чтение диссертации, вынуждая читателя попеременно обращаться к разделам данных глав.

2. Автор справедливо связывает повышение добротности резонанса, обсуждаемое в разделе 3.3, с взаимной компенсацией излучения мультиполей, что является прямым аналогом простой линейной

деструктивной интерференции. Вряд ли имеет смысл проводить тут какие-то аналогии с электромагнитно-индуцированной прозрачностью, являющейся принципиально нелинейным эффектом. Автору следовало бы быть аккуратнее при поиске аналогий в явлениях, исследуемых в смежных областях физики.

3. И аналитический теоретический анализ, и практически всё моделирование проведены автором в пренебрежении потерями на поглощение в диэлектрических материалах. Несмотря на преимущества диэлектрических структур, все они в реальности производят конечное, а зачастую, и очень заметное поглощение электромагнитной энергии. В диссертации отсутствует обсуждение того, какие уровни поглощения были бы допустимы для реализуемости рассмотренных явлений, что снижает практическую значимость.

Заключение

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

Диссертация была рассмотрена на заседании Объединённого научного семинара Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Протокол № 89 от 20.11.2019 г.).

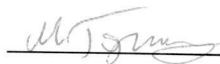
Диссертационная работа отвечает требованиям раздела II Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и соответствует специальности, а ее автор, Оспанова Анар, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв подготовил

Ведущий научный сотрудник Отдела теоретических исследований Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, кандидат физико-математических наук

e-mail: gorkunov@crys.ras.ru

Тел. +7(499)135-62-40



Горкунов Максим Валерьевич

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).

Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59. Тел.: +7(499)135-63-11
Оф. сайт: <http://www.kif.ras.ru>, E-mail: office@crys.ras.ru