

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Оспанова Анар

Электродинамические эффекты в метаматериалах с тороидным откликом

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Башарин Алексей Андреевич
кандидат технических наук, доцент

Москва, 2019

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Метаматериалы и метаповерхности – это искусственные периодические структуры, размеры ячеек которых меньше длины волны электромагнитного излучения. Впервые, теоретически метаматериалы были предсказаны профессором В. Г. Веселаго, который рассмотрел электродинамику среды с отрицательным показателем преломления в 1960-х годах [1]. Основываясь на этой идее, Джон Пендри впервые практически реализовал такую искусственную среду, ныне представляющую специфичную группу материалов – *метаматериалы*, отрицательный коэффициент преломления которых обеспечивался благодаря возникновению отрицательной магнитной проницаемости в периодической решетке разрезных кольцевых резонаторов (SRR – Split Ring Resonators) и отрицательной диэлектрической проницаемости на определенной частоте в тонких металлических проволочках [2].

Однако, последующие работы расширили применение метаматериалов, продемонстрировав возможность достижения таких свойств, как эффект сверхразрешения (преодоление дифракционного предела), возбуждение плазмонов, эффект клокинга или маскировки, и многие другие [3-5]. С другой стороны, это привело к повышению требований к свойствам метаматериалов, таким как сильная локализация полей в субволновых областях и высокая добротность метаматериалов за счет снижения радиационных и диссипативных потерь метатомов.

В связи с этим, следует выделить особый вид метаматериалов, характеризующийся сильным тороидным откликом, так называемые *тороидные метаматериалы* [6]. Возникающие в них эффекты обусловлены возникновением тороидного момента – отдельного элемента мультипольного разложения, соответствующего электрическим токам, циркулирующим по поверхности тора вдоль его меридианов (полоидные токи) [7].

Хотя стандартное мультипольное разложение демонстрирует излучаемые источником поля, тороидный дипольный момент не включен в это разложение и часто исключается из рассмотрения в классической электродинамике [8]. С момента предсказания существования *статического тороидного диполя*, его значение было обсуждено в ряде твердотельных систем, включая сегнетоэлектрики и наноферромагнетики и ферромагнитных микроструктурах, мультиферроиках, молекулярных магнитах и др. [6, 9, 10]. Исследование тороидных метаматериалов, кроме того, обусловлено возбуждением анапольной моды – безызлучательного состояния. Впервые возможность возбуждения анапольного состояния в метаматериалах была показана в работе [11]. В этой пионерской работе продемонстрирована возможность практической реализации анаполя, соответствующего минимальному полю рассеяния и максимальной электромагнитной энергии в ближней зоне элементов метаматериалов.

Возбуждение анапольной моды в метаматериалах и наночастицах имеет практическую важность для создания высокочувствительных резонаторов, высокочувствительных сенсоров для биологии, химии, наноиндустрии в широком диапазоне частот [12-26].

Другая важная проблема заключается в идентичности свойств тороидного и электрического дипольного момента в дальней зоне. Так, в литературе ведутся споры о необходимости учета тороидного дипольного момента в качестве отдельного члена мультипольного разложения [27, 28]. Очевидно, что необходимо экспериментальное подтверждение отличия ближних полей тороидного дипольного момента от распределения полей электрического дипольного момента, в том числе внутри метамолекулы тороидной топологии. Также важной проблемой в области электродинамики анапольных метаматериалов является отсутствие подхода для проектирования новых метаматериалов, форма токов во включениях которых должна подчиняться определенным условиям для обеспечения безызлучательного состояния.

Таким образом, актуальность работы заключается в разработке новых теоретических подходов для проектирования анапольных метаматериалов, дизайна новых метаматериалов тороидной топологии и исследование новых эффектов, возникающих в тороидных метаматериалах.

Цель работы: Разработка теории на основе метода эквивалентных источников для описания неизлучающих конфигураций и анапольных метаматериалов. Исследование эффектов, возникающих в тороидных метаматериалах. Разработка моделей диэлектрических метаматериалов оптического диапазона. Экспериментальное исследование ближних полей метачастиц с тороидной топологией.

Для достижения заявленных целей перед автором были поставлены следующие **задачи**:

1. Построить теоретический метод описания электродинамики анапольных мод;
2. Разработать модель мультипольной анапольной маскировки субволновых частиц;
3. Разработать модель электромагнитно–индуцированной прозрачности, возникающей в терагерцовом диэлектрическом метаматериале методом погашения основных типов мультиполей;
4. Разработать модель диэлектрических метаматериалов для демонстрации тороидного отклика в видимом диапазоне частот;
5. Разработать и экспериментально исследовать метамолекулы на основе воды для демонстрации тороидного дипольного отклика в ближней зоне в микроволновом диапазоне частот внутри частиц (*in situ*).

Научная новизна. В работе впервые продемонстрирован полностью диэлектрический метаматериал с тороидным откликом для видимого диапазона частот. Разработан теоретический метод эквивалентных источников, объединяющий электродинамику

неизлучающих конфигураций. Предложен новый метод электромагнитно-индуцированной прозрачности в диэлектрических метаматериалах, возникающий за счет погашения основных видов мультиполей. Впервые экспериментально продемонстрировано существование тороидного дипольного отклика в ближней зоне внутри метачастиц.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработана теория, описывающая электродинамику анапольных состояний в метаматериалах. Показано, что введение асимметрии в метаатомы метаматериалов приводит к возникновению состояния анаполя. Эта теория позволит использовать единый подход для проектирования анапольных метаматериалов и дает рекомендации для выбора токов смещения во включениях метаматериалов.

Кроме этого, разработана модель пассивного устройства мультипольной маскировки субволновых объектов за счет взаимодействия между мультиполями электрического и тороидного типов, которые приводят к возникновению анапольного состояния и уменьшению рассеяния от объекта. Этот тип маскировки позволит скрывать субволновые объекты обладающие электрическим дипольным моментом и строить сверхчувствительные сенсоры ближнего поля.

Продemonстрирован новый тип электромагнитно-индуцированной прозрачности в диэлектрических метаматериалах, возникающий за счет погашения возбужденных во включениях метаматериала мультиполей, что приводит к минимуму рассеянных полей и к возникновению пика прозрачности в спектре метаматериала. Этот тип прозрачности сопровождается высокой добротностью за счет пониженных радиационных потерь во включениях метаматериала и малых диссипативных потерь в диэлектриках, что может быть использовано для систем замедления света, в качестве открытых высокодобротных резонаторов с малыми радиационными и диссипативными потерями.

В работе предложена численная модель анапольного метаматериала оптического диапазона частот. Особенность этого метаматериала заключается в возможности изготовления перфорированных наноотверстий в кремниевой пластине по одношаговой технологии, что существенно для различных планарных оптических устройств и биологических сенсоров.

Помимо этого, в работе представлена и экспериментально исследована методом *in situ* диэлектрическая метамолекула на основе воды, с помощью которой доказано существование тороидного дипольного момента, благодаря подтверждению распределения ближних электромагнитных полей внутри тороидной метамолекулы. Практическая значимость эксперимента заключается в доказательстве отличия ближних полей тороидного дипольного момента, что важно для дальнейшего развития тороидной нанофотоники. Кроме того, практическая значимость исследования состоит в возможности лабораторного

прототипирования диэлектрических метаматериалов и предсказание эффектов в них за счет создания дешевых водных образцов.

Методы. Численные расчеты проводились в коммерческой программе трехмерного электродинамического моделирования High Frequency Structure Simulator (HFSS), разработанной фирмой ANSYS [29]. Эта программа позволяет выполнять электродинамические расчеты трехмерных моделей методом конечных элементов (FDTD). Были рассчитаны распределения электромагнитных полей, спектры прохождения/отражения, а также диаграммы рассеяния и направленности.

Исследование ближнепольных взаимодействий проводилось на основе метода мультипольного разложения ближних полей излучающих и рассеивающих структур [30]. Разложения производились для сильнейших мультиполей первого и второго порядка – диполей и квадруполь электрического, магнитного и тороидного типа.

Экспериментальное исследование метаматериалов на основе воды проводилось в безэховой камере зондированием распределения электрического и магнитного полей в ближней зоне в СВЧ диапазоне частот. Для измерения S-параметров (коэффициентов прохождения/отражения) использовался векторный анализатор цепей (VNA) Agilent E8362C [31].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан метод эквивалентных источников для анапольных метаматериалов;
2. Продемонстрирован эффект мультипольной пассивной маскировки, возникающий вследствие возбуждения анапольной моды между оболочкой и маскируемым объектом;
3. Представлен новый тип электромагнитно-индуцированной прозрачности в диэлектрических метаматериалах, возникающий за счет погашения возбужденных во включениях мультиполей;
4. Разработана численная модель перфорированного диэлектрического тороидного метаматериала для возбуждения анапольной моды в видимом диапазоне частот;
5. Экспериментально продемонстрировано распределение ближних электромагнитных полей внутри метамолекулы, обладающей тороидным дипольным моментом и подтверждено отличие тороидной моды от электрического дипольного момента.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 12th European Conference on Antennas and Propagation (9-13 April 2018, London, UK), International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (10-14 September 2018, Cartagena de Indias, Colombia), MetaNano 2018: The International Conference On Metamaterials And Nanophotonics (17-21 сентября 2018, Сочи, Россия), Nanophotonics and Micro/Nano Optics International Conference 2018 (1-3 October, 2018, Rome, Italy), International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (9-13 September 2019, Granada, Spain).

Личный вклад автора. Автор выполнила теоретическую часть работы, предложила модели метаматериалов, выполнила численный расчет представленных моделей, обработку и анализ результатов исследования, сопоставление результатов эксперимента с результатами численного и аналитического моделирования, подготовила публикации и доклады конференций.

Публикации. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в **3 (трех)** статьях в зарубежных реферируемых журналах, входящих в перечень Web of Science и список изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией России для опубликования научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Вклад соавторов. Все исследования проведены непосредственно самим соискателем и включали в себя теоретические и экспериментальные исследования. В частности, соискатель производил работы по расчету и разработке численных моделей и экспериментальных образцов, обработке полученных результатов и написании статей.

Все работы по теме диссертации опубликованы в соавторстве с научным руководителем А. А. Башариным, который проводил общее руководство исследованиями. Л. Матекович и Дж. Лабате принимали участие в разработке метода эквивалентных источников и модели устройства маскировки.

И.В. Стенищев и А. Ю. Бугакова принимали участие в численном моделировании электродинамики исследуемых структур. П. В. Капитанова и П. А. Белов выполнили экспериментальные микроволновые исследования.

Объём и структура диссертации. Работа изложена на 128 страницах и иллюстрирована 51 рисунками. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Список цитированной литературы содержит 293 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 содержит обзор литературы по электродинамике метаматериалов и возникающих в них эффектов, такие как отрицательное преломление, преодоление дифракционного предела, эффект маскировки (клокинга) (**раздел 1**). В **разделе 2** приведены основы метода мультипольного разложения основных типов мультиполей, в том числе тороидного, до октупольного порядка, и их диаграммы направленности. Показано, что взаимодействие мультиполей разного порядка и типов приводит к множеству эффектов, таких как резонанс Фано, условие Керкера, электромагнитно-индуцированная прозрачность (**раздел 3**).

В **разделе 4** приведен обзор литературы по тороидным метаматериалам, а также возникающим в них эффектам. Дано определение тороидного дипольного момента и представлена соответствующая электродинамика для описания объектов тороидной топологии и состояния анаполя.

Тороидный момент представляет собой отдельный член мультипольного разложения и обладает особой электромагнитной токовой конфигурацией. Полоидальные токи, текущие по меридианам структуры тороидной топологии, приводят к возникновению вихря магнитного поля внутри тороида (рисунок 1). В свою очередь магнитное поле, возбуждает в структуре динамический тороидный момент, осциллирующий вдоль главной оси тороида [13].

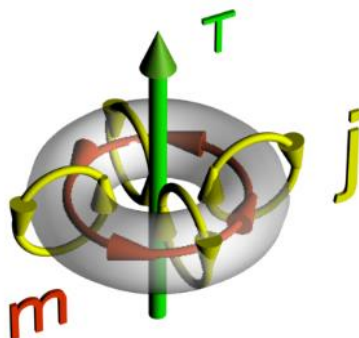


Рисунок 1 – Изображение электромагнитной конфигурации для возбуждения тороидного дипольного момента. Здесь $\mathbf{j}$ обозначает плотность тока, $\mathbf{m}$ – магнитный диполь, $\mathbf{T}$ – тороидный диполь.

Тороидный дипольный момент определяется следующим выражением [7]:

$$\mathbf{T} = \frac{1}{10c} \int d^3r [(\mathbf{r} \cdot \mathbf{j})\mathbf{r} - 2r^2\mathbf{j}], \quad (1)$$

где $\mathbf{j}$ обозначает плотность тока, $\mathbf{r}$ – радиус-вектор, c – скорость света.

Исследование тороидных метаматериалов, прежде всего, связано с возбуждением *ананольной моды* – безызлучательного состояния высокой добротности с пониженными радиационными потерями. Впервые возможность возбуждения ананольного состояния в метаматериалах была показана в работе [5]. В этой пионерской работе продемонстрирована возможность практической реализации ананольного состояния, соответствующего минимальному полю рассеяния и максимальной электромагнитной энергии в ближней зоне элементов метаматериалов. При условии $\mathbf{P} = -ik\mathbf{T}$, возникающим между электрическим и тороидным моментами, излучения электрического и тороидного диполей интерферируют деструктивно и полные электрическое и магнитное поля исчезают в дальней зоне. Таким образом, возникает состояние безызлучательного источника или *ананполя*, которое сопровождается сильными полями в области источника и отсутствием полей в дальней зоне.

Глава2 содержит теоретические и экспериментальные методы исследования электродинамических свойств тороидных метаматериалов. **Раздел 2.1** посвящен *методу эквивалентных источников*, являющимся обобщением теории неизлучающих систем на основе метода поверхностных импедансов. **Раздел 2.2** посвящен методу мультипольного разложения, учитывающий *тороидные мультиполи*. **Раздел 2.3** посвящен экспериментальному методу исследования электродинамических характеристик метамолекулы на основе воды в безэховой камере.

Глава 3 содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований работы.

Раздел 3.1 посвящен теории безизлучательных источников в приближении эквивалентных источников (рисунок 2). Предложенная теория базируется на представлении неизлучающего источника (клокинг, анапольная мода, трансформационная оптика и др.) в виде объема V , состоящего из объемного рассеивателя V_1 и дополнительного объема V_2 (рисунок 2а). Основным свойством неизлучающих источников является деструктивная интерференция между токами $\mathbf{j}_1$, возбужденного в объеме V_1 , и $\mathbf{j}_2$, возбужденного в дополнительном объеме или структуре V_2 , вследствие которой объект становится неизлучающим. Если этот объект 1 имеет дипольный отклик, описываемый вектором $\mathbf{P}$ поляризуемости, дополнительная структура 2 должна обладать распределением тока, порождающим аналогичное распределение поля в дальней зоне. Это может быть такой же дипольный отклик электрического типа, обладающий таким же распределением поля в дальней зоне, способным компенсировать излучение объекта 1. Однако, таким излучением обладает и другая конфигурация токов. К примеру, тороидный диполь характеризуется боковыми полоидальными токами, приводящими к вектору тороидизации $\mathbf{T}$ [7, 14] (рисунок 2б). При надлежащем возбуждении, излучения от обоих диполей $\mathbf{P}$ и $\mathbf{T}$ деструктивно интерферируют, приводя к неизлучающему состоянию.

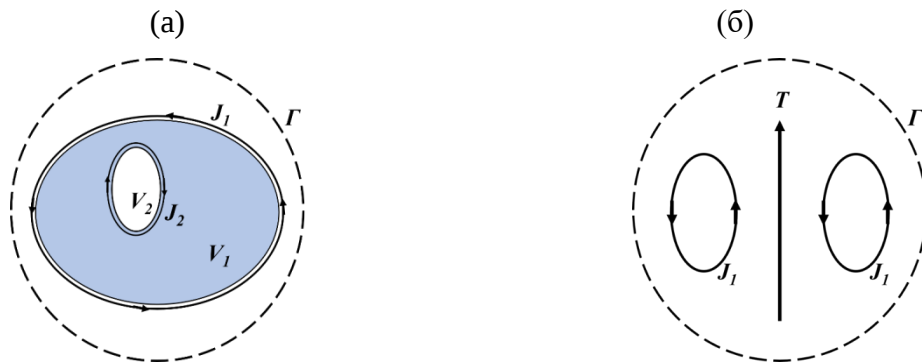


Рисунок 2 – Изображение неизлучающего источника объема V_1 , содержащего дополнительный компенсирующий объем V_2 . Γ обозначает мнимую границу между объемом V и внешней средой, $\mathbf{j}_1$ и $\mathbf{j}_2$ обозначают плотности токов. (а). Эквивалентное представление объемных тороидных источников (б).

Из уравнений Максвелла, в случае объемных источников, в которых учитываются явные формы объемных токов, можно получить:

$$i\omega\epsilon_0\mathbf{P} - Y_0\nabla \times \mathbf{M} = 0, \quad (4)$$

здесь $\mathbf{P}$ – вектор поляризуемости, $\mathbf{M}$ – намагниченность системы, Y_0 – адмиттанс внешней среды.

Это уравнение описывает требуемое взаимодействие между векторами $\mathbf{P}$ поляризуемости и ротором намагниченности $\mathbf{M}$ в неизлучающей системе. Так как намагниченность соответствует вихрю тороидного дипольного момента в объемной системе, т.е.

$$\mathbf{M} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (5)$$

(4) можно переписать как

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{T} - ik_0 \mathbf{P} = 0 \quad (6)$$

Основываясь на этом рассуждении, можно применить теорему IV Devaney-Wolf [26], в которой утверждается, что, если $\mathbf{F}$ - произвольная векторная функция, подчиняющаяся условию

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{F} - k_0^2 \mathbf{F} = 0, \quad (7)$$

то в системе устанавливается неизлучающее состояние для этой функции. Сравнивая уравнения (6) и (7), соотношение между $\mathbf{P}$ и $\mathbf{T}$ приводит к неизлучающей конфигурации. В частности, предполагая, что $\mathbf{F} \equiv \mathbf{T}$, можно видеть, что для

$$\mathbf{P} = -ik_0 \mathbf{T} \quad (8)$$

уравнения (6) и (7) идентичны, то есть поля $\mathbf{T}$ и $\mathbf{P}$ в дальней зоне будут скомпенсированы, следовательно, получается неизлучающая система. Уравнение (8) согласуется с результатом работы Афанасьева и Дубовика [7], найденным для установления анапольной моды. Это свидетельствует о идентичности условий для безызлучательных состояний в разных областях исследований. Основной вывод раздела 3.1 заключается в том, что для построения неизлучающих конфигураций и анапольных частиц необходимо возбудить токи в системе, дипольные моменты которых подчиняются уравнениям (5) и (6).

Помимо электродинамики в целом, рассмотренный формализм имеет особое значение для областей анапольных метаматериалов, нанофотоники и теории невидимости. Более того, в рамках этого формализма сформирован общий подход к созданию неизлучающих источников и рассеивателей. В частности, было показано, что любая неизлучающая конфигурация всегда появляется вследствие двух деструктивно осциллирующих мод, взаимодействующих в соответствии с (6). Этот подход полностью согласуется с понятиями электрических и магнитных анапольных мод [13, 32, 33]. Ряд работ подтверждает ключевую роль анапольного возбуждения в подавлении рассеивающих свойств простых структур, таких как диэлектрические нанодиски, кластеры и гибридные SRR [13, 32, 34], что в будущем может быть применено для анализа электромагнитного отклика более сложных структур рассеивателей и систем прозрачности.

Раздел 3.2 посвящен теоретическому исследованию модели пассивной маскировки на основе мультипольного взаимодействия внешней электромагнитной волны с ближними полями маскирующей оболочки и скрываемого объекта (рисунки 3).

Анапольное состояние, как результат деструктивного возбуждения электрической и торoidalной мод, приводит к компенсации и подавлению полей, рассеиваемых ими в дальнем поле источника, в результате чего источник становится неизлучающим. Подобная интерференция полей наводит на мысль о создании нового типа маскировки на основе компенсации полей, вызванного деструктивным характером взаимодействующих мультиполей,

так называемого *метода мультипольной маскировки* (multipolar cloaking). Данный тип маскировки действует иначе, по сравнению с другими известными типами маскировки на основе компенсации рассеяния [5, 35-37], в которых невидимость возникает вследствие взаимодействия падающей электромагнитной волны как с маскировочным покрытием, так и маскируемым объектом. В основе метода мультипольной маскировки лежит анапольное состояние, заимствованное из теории безызлучательных систем, что еще раз доказывает о “родственности” этих направлений [38, 39]. В этом разделе мы рассмотрим эффект невидимости, возникающий в модели маскировочной метамолекулы на основе неизлучающего анапольного состояния, которое, в отличие от [17], является пассивным устройством, возбуждаемым внешним источником.

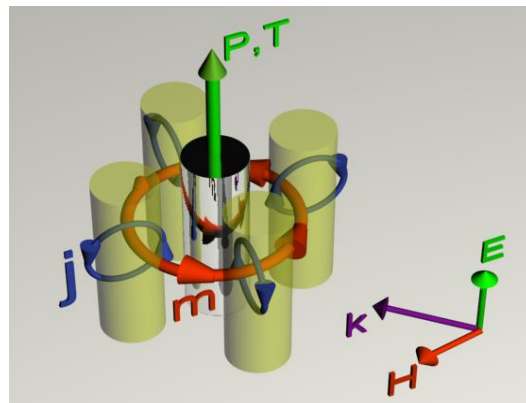


Рисунок 3 – Изображение модели пассивной маскировки, состоящей из кластера металлического и диэлектрических цилиндров. **P** и **T** обозначают электрический и торoidalные дипольные моменты, соответственно, **j** – токи смещения, **m** – магнитный отклик.

Модель мультипольной маскировки представляет собой ромбическую метамолекулу, состоящую из идеально проводящего (PEC) цилиндра радиусом $r=2.5$ мкм, окруженного четырьмя диэлектрическими цилиндрами диэлектрической проницаемости $\epsilon_r=41.4$, что соответствует диэлектрической проницаемости в терагерцовом режиме танталата лития LiTaO₃ [40]. Все цилиндры предполагаются бесконечной высоты h и радиуса $R=5$ мкм, расстояние между центрами цилиндров составляет $l=12$ мкм. Подобранный геометрия и параметры метамолекулы приводят к возбуждению внешним электромагнитным полем сильного торoidalного отклика внешних диэлектрических цилиндров и сильного электрического отклика в центральном цилиндре. В целях упрощенного численного анализа, структура предполагается находящейся в вакуумной среде и ее электромагнитный отклик основан на индуцированных внешней ТМ-поляризованной волной токами смещения в боковых цилиндрах и токе в центральном цилиндре. Рассеяние от устройства мультипольной маскировки оценивается значениями ЭПР – эффективной площадью рассеяния (RCS), рассчитанными в дальней зоне. Рассеяние от метамолекулы (синяя кривая), представляющей собой комбинацию электрического рассеивателя (цилиндр из PEC, черная кривая) и диэлектрической оболочки

(четыре цилиндра из LiTaO_3 , красная кривая) значительно ниже рассеяния от каждого из них по отдельности (рисунок 4), что соответствует эффекту маскировки (клокинга) на основе компенсации полей (mantle cloaking).

Рисунок 4 – Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) одиночного рассеивателя (черная кривая), диэлектрической оболочки (красная кривая) и маскирующего устройства (синяя кривая) в диапазоне частот 3-3.8 ТГц.

С другой стороны, такое распределение полей соответствует установлению анапольной моды, при которой не происходит возмущения внешнего поля, т.е. рассеяния от структуры не происходит. Это подтверждается мультипольным разложением ближнего поля вблизи частоты минимального рассеяния, проведенного в рамках электрического $\mathbf{P}$ (красная кривая), магнитного $\mathbf{M}$ (синяя кривая) и тороидного $\mathbf{T}$ (зеленая кривая) дипольных, электрического $\mathbf{Qe}$ (розовая кривая) и магнитного $\mathbf{Qm}$ (голубая) квадрупольных моментов (рисунок 5).

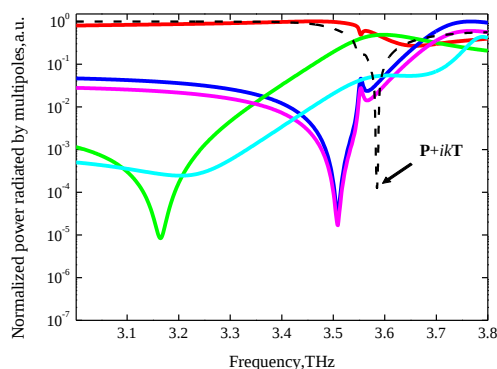


Рисунок 5 – Нормализованное распределение энергии мультиполей устройства маскировки в рамках пяти сильнейших мультиполей в диапазоне частот 3-3.8 ТГц.

В диапазоне частот 3.4-3.65 ТГц энергии электрического и тороидного диполей (красная и зеленая кривые) преобладает над другими мультиполями и равны на частоте 3.58 ТГц, на которой и наблюдалось минимальное рассеяние поля. Более того, подсчитанная разность фаз излучений электрического и тороидного диполей (черная штриховая кривая), действительно соответствует соотношению между диполями $\mathbf{P}=-ik\mathbf{T}$, которое соответствует возбуждению анапольного состояния.

Как показано в работе [41], подобные конфигурации, в которых скрываемый объект комплектуется маскирующими объектами, удобны для задач маскировки, так как скрываемый объект не находится в прямом взаимодействии с маскирующей оболочкой и покрыт ею не полностью. Однако, продемонстрированные в [41] маскировочные устройства пассивного характера и основаны на плазмонном взаимодействии, требующим применения материалов с отрицательной диэлектрической проницаемостью, в то время как представленная конфигурация

состоит из веществ с положительными значениями диэлектрической проницаемости. В качестве возможных применений, стоит отметить спрос на устройства неразрушающего контроля наномасштабных систем, которое может быть проведено субволновыми маскирующими системами. К примеру, инвазивное введение электрических зондов в среду исследования приводит к неизбежному перераспределению поля в окрестностях зонда, тем самым к искажению поля и, следовательно, фальсификации результатов измерения. С помощью субволнового электрического зонда, поле которого замаскировано, производится исследование невозмущенного ближнего поля системы, так называемое неинвазивное зондирование [42]. Приборы с низким уровнем возмущения востребованы во многих современных приложениях биологии и медицины, в которых необходимо наноскопическое изображение наночастиц и молекул различной природы. Зачастую, большинство исследований проводятся в непосредственной близости наночастицы и требует “чистоту” сигнала, в том числе исключения белого шума прибора, понижающего точность исследований. Одним из возможных решений может стать “маскировка” сенсора, которая исключает искажения ближнего поля.

В **разделе 3.3** продемонстрирована численная модель высокодобротного метаматериала, демонстрирующего новый эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП, EIT – electromagnetically induced transparency) за счет обнуления основных мультипольных моментов, таким образом, качественно отличающегося от других типов, основанных на взаимодействии излучающих мод. Узкий пик прохождения в спектре пропускания, так называемое “окно прозрачности”, в оптическом диапазоне является одним из многообещающих эффектов в нанофотонике. Этот эффект обеспечивает новую область применения в электронике и оптике, а именно: замедление света и длительные задержки импульсов для хранения оптических данных, частотную селективность для узкополосных фильтров, усиление нелинейных эффектов и для усиления взаимодействия света с веществом в фотонике [43]. В последнее время, классический аналог квантового EIT эффекта впервые экспериментально был продемонстрирован в метаматериалах в микроволновом диапазоне частот [44]. Одним из методов возбуждения “окна прозрачности” является перекрытие электрических и магнитных мультиполей в плазмонных и диэлектрических частицах [45]. Это явление, называемое Фано-резонанс, возникает из-за интерференции между различными элементами, составляющих метамолекул [46, 47]. Другой метод наблюдения ЭИП в метаматериалах – это “захват” падающей электромагнитной волны и возбуждение деструктивной интерференции между мультиполями одного типа в метаматериалах [4, 48]. Помимо этого, анапольную моду можно определить как третий основной метод прозрачности, создаваемый деструктивной интерференцией между электрическим и тороидным дипольными моментами с одинаковыми интенсивностями и угловым моментом [11, 13, 16]. Все вышеупомянутые системы обладают

малыми радиационными потерями и демонстрируют прозрачность из-за деструктивной интерференции основных двух мультиполей того же порядка и подавления других мультиполей. Однако, в этом разделе мы рассматриваем эффект прозрачности, возникающий в метаматериалах за счет обнуления основных возбужденных дипольных моментов, что приводит к нулевым радиационным потерям в диэлектрических метаматериалах.

Наш метаматериал, представляющий такую модель, состоит из периодически расположенных кластеров идентичных субволновых диэлектрических цилиндров бесконечной длины h , расположенных в ромбической ячейке, окружающая среда является вакуумом (рисунок 6). Электромагнитные свойства системы характеризуются токами смещения $\mathbf{j}$, индуцируемыми внешней электромагнитной волной в каждом цилиндре. Эти токи порождают электромагнитное рассеяние (рассеяние Ми), которое становится резонансным при правильно подобранных параметрах метаматериала, которые, в нашем случае, имеют значение радиуса $r=5$ мкм, расстояния между центрами цилиндров $l=12$ мкм, диэлектрической проницаемости материала цилиндров ($\epsilon_r=41.4$, соответствующей LiTaO_3) и периодичности кластеров $d=60$ мкм.

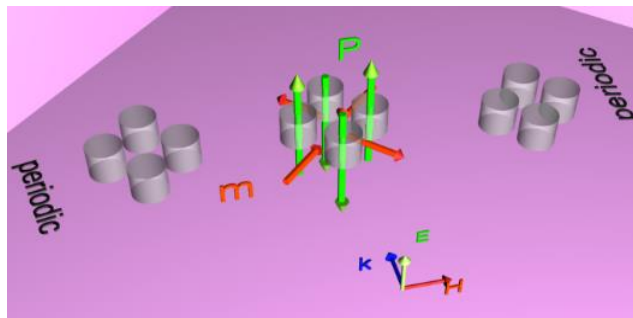


Рисунок 6 – Иллюстрация метаматериала из ромбических ячеек, состоящих из четырех идентичных параллельных диэлектрических цилиндров. $\mathbf{P}$ и $\mathbf{T}$ обозначают электрический и тороидный диполи, соответственно, $\mathbf{j}$ – петли токов смещения, $\mathbf{m}$ – магнитный отклик.

Внешняя ТМ-поляризованная волна возбуждает электрический дипольный момент $\mathbf{P}$ в каждом цилиндре, при этом, в силу геометрии структуры, в каждом соседнем цилиндре он направлен в противоположную сторону: пара цилиндров 1 и 3 и пара 2 и 4 имеют одинаковое направление электрического момента, приводящего к возникновению двух петель токов смещения $\mathbf{j}$. Чередующаяся пара петель ($\mathbf{j}_{23}$ и $\mathbf{j}_{41}$) порождает два ортогональных им магнитных диполя $\mathbf{m}$ (2' и 4') направленных от центра кластера, другая пара петель ($\mathbf{j}_{12}$ и $\mathbf{j}_{34}$) порождает другие два ортогональных магнитных диполя (1' и 3'). Такая направленность токов и магнитных диполей приводит к деструктивной интерференции соседних пар магнитных диполей, приводящей к исчезновению полного магнитного отклика системы. По аналогии, исчезает и полный электрический дипольный отклик метаматериала. Обнуление

электромагнитного отклика подобным образом приводит к полному прохождению электромагнитной волны сквозь такой метаматериал.

Моделирование структуры действительно указывает на возникновение острого узкого пика прохождения на частоте 2.2446 ТГц, амплитуда и ширина которого равна 1 и 0.0017 ТГц, соответственно, что соответствует высокой добротности, равной $Q = f_0/\Delta f = 1320$ (рисунок 7).

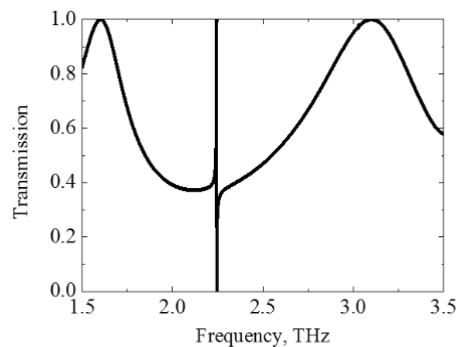


Рисунок 7 – Спектр прохождения метаматериала в диапазоне частот 1.5 – 3.5 ТГц.

Распределение полей на этой резонансной частоте 2.2446 ТГц подтверждает, что фазы электрических полей соседних цилиндров противоположны, что свидетельствует о появлении круговых токов смещения в каждой паре цилиндров (рисунок 8а), которые возбуждают магнитные поля между цилиндрами (рисунок 8б). Сильная локализация магнитного поля между цилиндрами указывает на ближнепольную связь между ними. Противоположность фаз этих магнитных моментов приводит к нулевому магнитному отклику всего метаматериала. Очевидно, что электрический отклик метаматериала также исчезает.

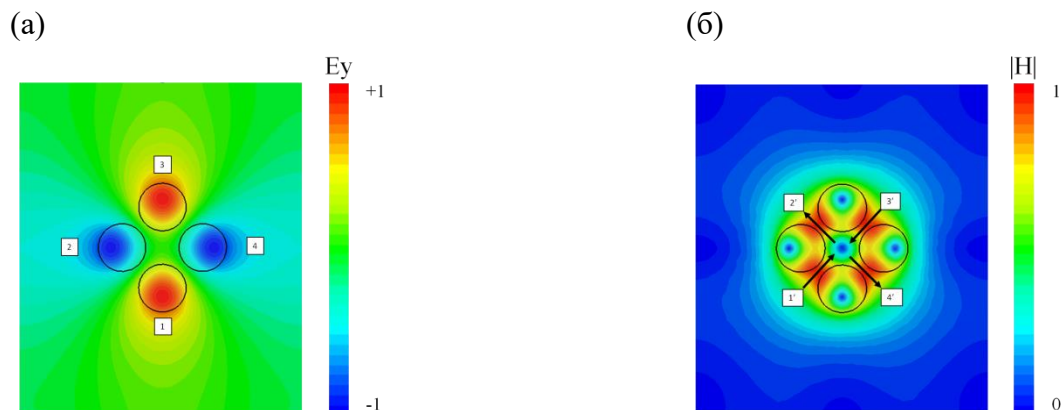


Рисунок 8 – Распределение y-компоненты (параллельно оси цилиндров) электрического поля (а) и абсолютного значения магнитного поля (б) в метаматериале.

Проанализировав ближнепольное рассеяние методом мультипольного разложения, можно увидеть, что резонансный пик прохождения соответствует подавлению основных типов мультиполей, учтенных при разложении: электрический **P** (голубая кривая), магнитный **M** (розовая кривая) и тороидный **T** (зеленая кривая) дипольные моменты, электрический **Qe** (серая кривая) и магнитный **Qm** (фиолетовая кривая) квадрупольные моменты (рисунок 9).

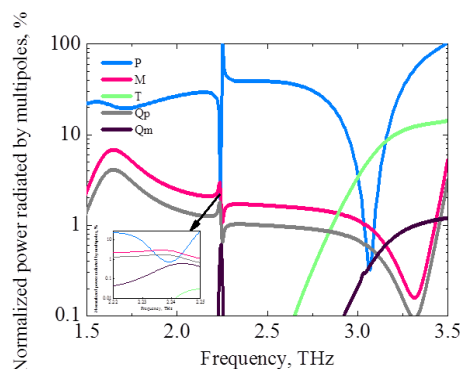


Рисунок 9 – Нормированная мощность излучения мультиполей ближнепольного распределения поля метаматериала в диапазоне частот 1.5 – 3.5 ТГц.

В исследованном диапазоне 1.5-3.5 ТГц электрический дипольный момент доминирует над остальными мультиполями и претерпевает резкий спад на резонансной частоте 2.2446 ТГц, что связано с обнулением электрических полей соседних цилиндров. Аналогичный спад претерпевает и магнитный дипольный момент, который имеет меньшую в 10 раз интенсивность по сравнению с электрическим дипольным моментом. Торoidalный дипольный и квадрупольные моменты имеют малые, практически нулевые интенсивности в около резонансных частотах, что уменьшает радиационные потери и обуславливает высокую добротность пика прохождения. Проведенный мультипольный анализ свидетельствует о возникновении нового типа мультипольного взаимодействия, приводящего к новому виду прозрачности типа классического аналога электромагнитно-индуцированной прозрачности, возникающий за счет обнуления основных типов мультипольных возбуждений. Примечательно, что данный эффект сопровождается высокой добротностью пика прохождения и достигает $Q=1320$.

Раздел 3.4 посвящен исследованию возбуждения торoidalного дипольного момента в оптическом диапазоне частот и представлена численная модель метаматериала на основе перфорированной диэлектрической пластины, поддерживающего анапольную моду в видимом спектральном диапазоне частот. Преимуществом данного метаматериала является простота фабрикации, вследствие чего он имеет очевидное практическое приложение: поддерживает анапольное состояние без сложной трехмерной торoidalной геометрии и может быть изготовлен одношаговым методом фабрикации.

Метамолекула состоит из кластера четырех сквозных перфорированных отверстий в кремниевой пластине ($\epsilon=11.9$) периодичностью $P=200$ нм и толщиной $h=100$ нм (рисунок 10).

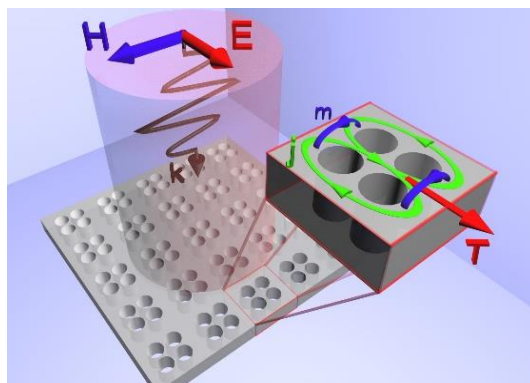


Рисунок 10 – Изображение кремниевого метаматериала и распределения возбуждаемых в метамолекуле токов и мультиполей. Вкладка показывает возбуждение торoidalного T момента. E и H обозначают электрическую и магнитную компоненты падающего поля, соответственно, k – волновой вектор, j – ток смещения, m – магнитный момент.

Диаметр каждого отверстия равен $d=45$ нм, расстояние между ними $s=55$ нм. Внешняя ТМ-поляризованная волна падает по нормали к поверхности, электрическая компонента возбуждает токи смещения j в объеме метаматериала, которые принимают форму петель, обхватывающих по паре отверстий. Эти круговые токи, по аналогии с полоидальными токами, порождают ортогональную им замкнутую петлю магнитного поля m , которая вместе с круговыми токами приводит к возбуждению торoidalного отклика T метатома вдоль направления E -компоненты внешней волны. Согласно [7], для возбуждения анаполя необходимо установление соотношения $P=-ikT$, что приводит к полной прозрачности структуры. Рассчитанный спектр пропускания метаматериала (рисунок 11, черная кривая) характеризуется пиком прохождения на частоте 566.5 ТГц.

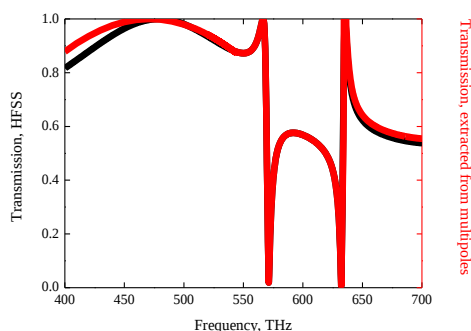


Рисунок 11 – Моделированное (черная кривая) и восстановленное (красная кривая) из интенсивностей мультиполей спектры прохождения в диапазоне 400-700 ТГц.

Это подтверждается мультипольным разложением токов смещения в рамках дипольных (электрический P (красная кривая), магнитный M (синяя кривая) и торoidalный T (зеленая кривая)) и квадрупольных (электрический Q_e (розовая кривая), магнитный Q_m (голубая кривая), а также торoidalный Q_t (коричневая кривая)) моментов в диапазоне 400-700 ТГц (рисунок 12). В диапазоне 550-560 ТГц интенсивности излучения торoidalного и электрического

дипольных моментов максимальны по сравнению с другими мультиполями, что и обуславливает подобное распределение полей внутри метаматериала. На резонансной частоте 566.5 ТГц интенсивности электрического $\mathbf{P}$ и тороидного $\mathbf{T}$ дипольных моментов равны и их фазы находятся в соотношении $\mathbf{P} = -ik\mathbf{T}$, что приводит к взаимному исключению их полей рассеяния, следовательно, установлению анапольной моды. Стоит отметить, что интенсивности остальных мультиполей достаточно высоки и отстают всего на один порядок (магнитный диполь) или на два порядка (квадруполь), что приводит к уширению пика прохождения, следовательно, подавлению добротности из-за возникающих нерадиационных потерь. Восстановленный из шести мультиполей спектр прохождения совпадает с моделированным спектром прохождения, что свидетельствует о достоверности использованного метода мультипольного разложения.

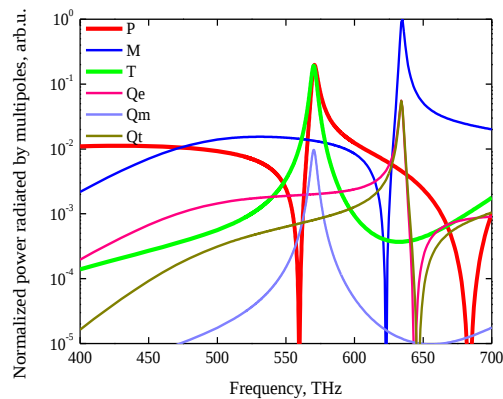


Рисунок12 – Нормированная мощность мультиполей в диапазоне 400-700 ТГц.

Основная цель данной работы заключалась в демонстрации простого способа реализации анапольного оптического материала на основе диэлектриков. Помимо ожидаемых эффектов, проявляемых на основе анапольного состояния, такие метаматериалы обладают низкими диэлектрическими потерями, необходимыми в реализации оптических устройств. Данный метаматериал имеет очевидные преимущества в изготовлении: перфорация наноотверстий может быть выполнена, к примеру, методом ФИП, применяемым в наномасштабе. Кремний является наиболее предпочтительным материалом в оптике, из-за развитой технологии изготовления кремниевых шаблонов [49, 50]. Кроме этого, наночастицы кремния электрически и термически устойчивы, с их помощью удобно демонстрировать нелинейные эффекты. Поскольку изготовление методом ФИП состоит из одношаговой процедуры, массовое применение оправдано выгодой, как по времени, так и по цене изготовления. С другой стороны, данная структура применима в оптическом биосенсировании и маскировке. Жидкость, помещенная в такой кластер, точно заполняет форму отверстий и приводит к сдвигу отклика, вследствие чего упрощается процесс анализа жидкости, так называемого биосенсирования. Также, метаматериал можно использовать в качестве элемента маскирующих устройств.

В разделе 3.5 приведено экспериментальное, так называемое *in situ* подтверждение существования тороидного дипольного момента путем измерения электрического и магнитного полей внутри метамолекулы из воды тороидальной топологии в микроволновом диапазоне частот. Поскольку вода является жидким диэлектриком, а ее диэлектрическая проницаемость на частотах до 5 ГГц обладает действительной частью со значением около 70, то предоставляется возможность “изучить” метамолекулы воды изнутри, чтобы выяснить, что именно происходит с электромагнитными полями внутри диэлектриков [51], а также подтвердить теорию рассеяния Ми на диэлектрических частицах и даже убедиться в правдивости теории Максвелла “вживую”, описывающей поведение электромагнитных волн в диэлектриках.

Для этого мы исследуем метамолекулу, которая состоит из четырех полистирольных вытянутых трубок с водой (рисунок 13).

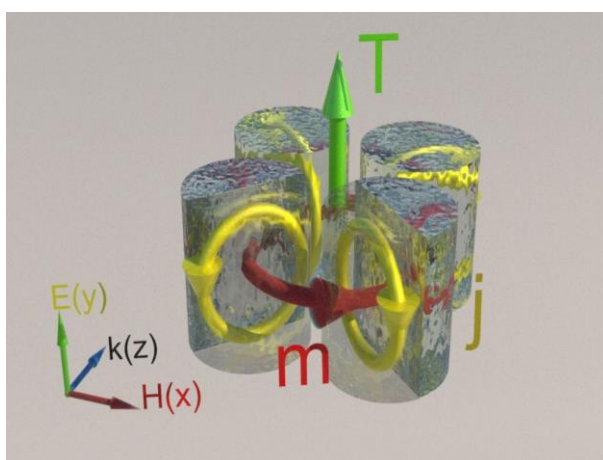


Рисунок 13 – Иллюстрация тороидного отклика в системе из четырех диэлектрических трубок с водой. $\mathbf{j}$ обозначает токи смещения, $\mathbf{m}$ – магнитный момент, $\mathbf{T}$ – тороидный дипольный момент.

Трубки высотой h и радиусом r расположены по углам метамолекулы квадратной формы с расстоянием между центрами d . Как и для любой диэлектрической частицы, электромагнитный отклик метамолекулы из воды возникает за счет токов смещения $\mathbf{j}$, возникающих в каждой трубке за счет падающей внешней электромагнитной волны. В нашем случае токи смещения возбуждаются ТМ-поляризованной плоской электромагнитной волной, и внешне напоминают полоидальные токи в тороидоподобной структуре (рисунок 13). Подобранные параметры метамолекулы вызывают резонансное электромагнитное рассеяние, также называемое Ми-резонанс, в каждой трубке. Ми-резонансы магнитного типа приводят к возбуждению замкнутой магнитной моды $\mathbf{m}$, магнитное поле которой пронизывает каждую трубку и вместе с токами смещения $\mathbf{j}$ создает тороидный дипольный отклик $\mathbf{T}$, колеблющийся вдоль оси цилиндров.

Для оценки вклада тороидного отклика численно изучены спектры пропускания и отражения, а также распределения ближних электромагнитных полей метамолекулы. Численная модель была построена и исследована на платформе CST Microwave Studio [52] с использованием открытых граничных условий и модели Дебая для диэлектрической

проницаемости воды из библиотеки платформы. **Е**-компонента поля параллельна осям трубок (вдоль оси y), открытые волноводные порты установлены вдоль оси z .

Электродинамические характеристики смоделированной метамолекулы свидетельствует о возникновении пика в спектре прохождения на частоте 1.05 ГГц, для размеров метамолекулы $r = 1.1$ см, $h = 20$ см и $d = 3$ см численно обнаружен пик прохождения на частоте 1.05 ГГц (рисунок 14).

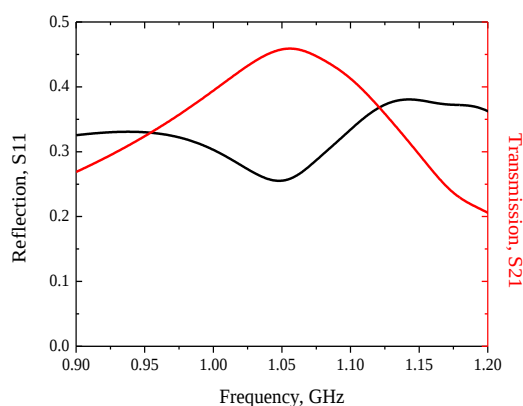


Рисунок 14 – Рассчитанные спектры прохождения и отражения в диапазоне частот 0.9-1.2 ГГц.

Возбуждение тороидного момента подтверждается также проведенным мультипольным анализом токов смещения (рисунок 15). Нормированная энергия, рассеиваемая мультиполями, представлена в рамках пяти сильнейших компонентов: электрический **Р** (черная точечная линия), магнитный **М** (красная пунктирная линия), тороидный **Т** (синяя сплошная линия) дипольные моменты, электрический **Q_e** (зеленая пунктирная линия) и магнитный квадрупольные моменты **Q_m** (розовая пунктирная линия), нормированные на мощность падающей волны. Согласно смоделированным спектрам прохождения, основной вклад в пик прохождения вносит тороидный дипольный момент, превышающий вклад самого сильного электрического дипольного момента более чем в три раза на частоте 1.1 ГГц (рисунок 15).

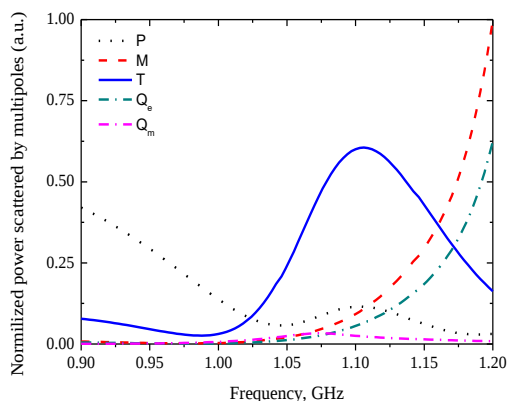


Рисунок 15 – Нормализованная мощность, рассеянная мультиполями в диапазоне 0.9-1.2 ГГц.

Для экспериментального исследования метамолекулы был изготовлен образец из четырех полистирольных трубок, заполненных дистиллированной водой и закрепленных с помощью пенопластовых держателей. Образец метамолекулы был установлен в безэховой камере. Широкополосная прямоугольная рупорная антенна, подключенная к первому передающему порту векторного анализатора цепей (VNA) Agilent E8362C [31], располагалась на расстоянии 2 м от образца метамолекулы. В ходе экспериментальных исследований сканировалось распределение электрического и магнитного полей внутри трубок с использованием электрического и магнитного зондов, соответственно. Эти зонды были подключены к пошаговому координатному контроллеру для сканирования ближних полей и подключены ко второму порту VNA. Влияние материала трубок привело к спектральному сдвигу характеристик метамолекулы на частоту 0.98 ГГц, распределение электрических и магнитных полей на которой имеет сходство с результатами численной модели (рисунок 16).

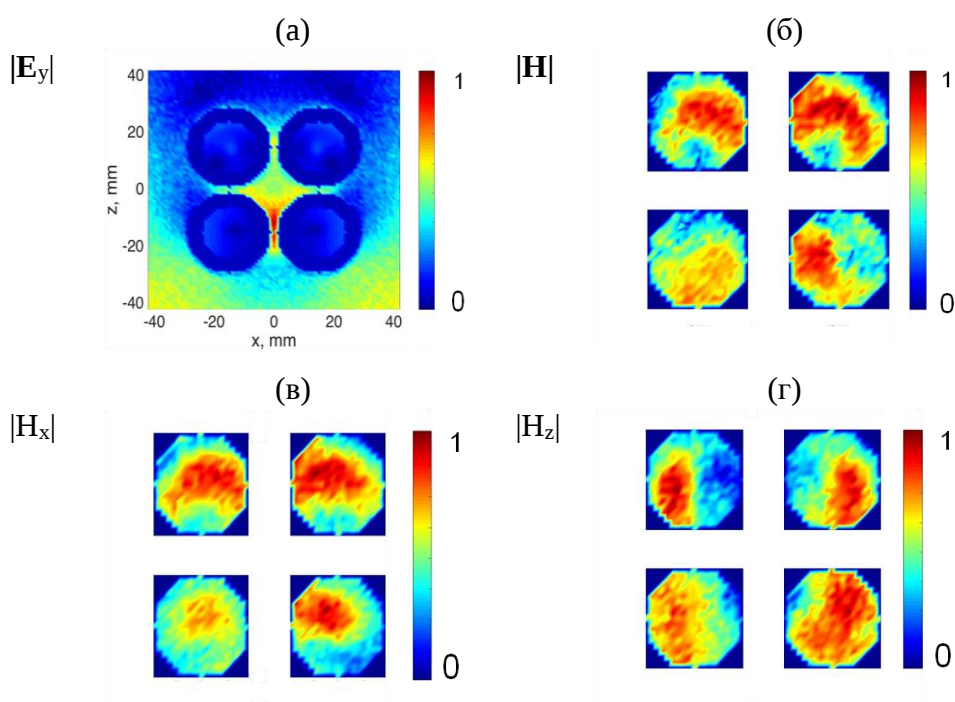


Рисунок 16 – Экспериментально исследованные амплитуды распределения электрического (а) и магнитного (б-г) полей на частоте 0.9 ГГц. Поля нормализованы на максимальные значения.

Представленное экспериментальное исследование наглядно продемонстрировало возможность возбуждения и распределения ближних полей тороидного момента внутри метамолекулы. Теоретически и экспериментально подтверждено возбуждение тороидного дипольного отклика в метамолекуле на основе воды, где дистиллированная вода используется в качестве конструкционного материала. Представленные результаты моделирования демонстрируют распределение электрического и магнитного полей, необходимое для возбуждения тороидного отклика. Примечательно, что экспериментальная часть включала прямые измерения в ближнем поле – тем самым мы подтвердили возбуждение тороидного

момента *in situ*. Мы полагаем, что эти результаты положат конец спорам о значимости тороидного отклика как отдельного члена мультипольного ряда, имеющего отличные от электрического дипольного момента распределения ближних полей. С другой стороны, доказательства имеют концептуальный характер – результаты экспериментов, выполненные в микроволновом диапазоне частот, за счет линейности уравнений Максвелла будут идентичны (с поправкой на фабрикацию) для диэлектрической нанофотоники в оптическом диапазоне.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты работы:

1 Построен метод эквивалентных источников для неизлучающих конфигураций. Было выведено общее условие для конфигурации токов и полей, приводящих к неизлучающему состоянию типа анапольной моды. На примере диэлектрического метаматериала с режимом анаполя показана работоспособность разработанной теории.

2 Предложен эффект пассивной маскировки (клокинга) субволновых частиц на основе мультипольного взаимодействия между маскирующей оболочкой и маскируемого объекта. Расчеты ЭПР и распределения ближних полей показали, что эффект клокинга возникает вследствие возбуждения анапольной моды.

4 Представлен новый эффект классического аналога электромагнитно-индуцированной прозрачности в диэлектрических метаматериалах. Численно продемонстрирован высокодобротный пик в спектре прохождения метаматериала за счет обнуления интенсивностей основных возбужденных мультиполей.

5 Предложен диэлектрический тороидный метаматериал на основе перфорированной кремниевой пластины и продемонстрирована анапольная мода в видимом диапазоне частот.

6 Впервые экспериментально продемонстрированы ближние электромагнитные поля в тороидной метачастице *in situ*. Показано отличие тороидной моды от электрической, что указывает на необходимость учета тороидного дипольного момента в ряде мультипольного разложения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Из списка BAK и WoS:

1. Anar K. Ospanova, Alina Karabchevsky and Alexey A. Basharin, Metamaterial Engineered Transparency due to nullifying of multipole moments. Optics Letters 43, 3, 503-506 (2018).

2. Anar K. Ospanova, Ivan Stenishchev and A.A. Basharin, Anapole mode sustaining silicon metamaterials in visible spectral range. Laser and Photonics Review, 12, 7, 1800005 (2018).

3. A. K. Ospanova, G. Labate, L. Matekovits and A. A. Basharin, Multipolar passive cloaking by anapole excitation. Sci. Rep., 8, 1, 12514 (2018).

Труды конференций:

1. A. K. Ospanova, I. V. Stenishchev and A. A. Basharin, Perforated all-dielectric anapole metamaterials. Book of Abstracts of International Conference on Metamaterials and Nanophotonics Metanano 2018 (2018).
2. Anar K. Ospanova, Giuseppe Labate, Ladislau Matekovits, Alexey A. Basharin, Subwavelength cloaking device due to anapole mode excitation. 2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) 633-635 IEEE (2018).
3. Ivan V. Stenishchev, Anar K. Ospanova, Alexey A. Basharin, All-dielectric metamaterials in visible spectral range. Anapole mode excitation. 2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) 640-642 IEEE (2018).
4. A. K. Ospanova, Alina Karabchevsky and Alexey A. Basharin, Novel transparency effect in all-dielectric metamaterials due to all kind multipoles cancellation. Book of Abstracts of 12th European Conference on Antennas and Propagation (2018).
5. Anar K. Ospanova, Ivan V. Stenishchev, Alexey A. Basharin, Perforated all-dielectric anapole metamaterials. Journal of Physics: Conference Series 10921, 012106, IOP Publishing (2018).
6. Anar K. Ospanova, Alexey A. Basharin, Metamaterials with broken symmetry: general approach, experiment and multipolar decomposition. Book of abstracts, 201, Photonica-2017 (2017).

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 V. G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . Sov. Phys. Usp. 10(4), 509-514 (1968).
- 2 J. B. Pendry, D. R. Smith, Reversing Light with Negative Refraction. Physics Today 57 (6) (2004).
- 3 J. B. Pendry, Negative refraction makes a perfect lens. Phys Rev Lett 85, 3966-3969 (2000).
- 4 V. A. Fedotov, M. Rose, S. L. Prosvirnin, N. Papasimakis & N. I. Zheludev, Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry. Phys. Rev. Lett. 99, 147401 (2007).
- 5 A. Alu, Mantle cloak: invisibility induced by a surface. Phys. Rev. B 80, 245115 (2009).
- 6 T. Kaelberer, V. A. Fedotov, N. Papasimakis, D. P. Tsai & N. I. Zheludev, Toroidal Dipolar Response in a Metamaterial. Science 330, 1510–1512 (2010).
- 7 G. N. Afanasiev & V. M. Dubovik, Some remarkable charge-current configurations. Phys. of Part. and Nuclei 29, 366–391 (1998).
- 8 J. D. Jackson, Classical Electrodynamics (Wiley, New York, 1962).
- 9 А. А. Горбачевич, О. Е. Омеляновский, В. И. Цебро, Тороидное упорядочение в кристаллах и наноструктурах. УФН 179, 887–897 (2009).

- 10 Ю. В. Копаев, Тороидное упорядочение в кристаллах. УФН, 1175-1190 (2009).
- 11 V. A. Fedotov, A. V. Rogacheva, V. Savinov, D. P. Tsai, N. I. Zheludev, Resonant Transparency and Non-Trivial Non-Radiating Excitations in Toroidal Metamaterials. Scientific Reports 3 296 (2013).
- 12 G. N. Afanasiev and Y. P. Stepanovsky, The Electromagnetic Field of Elementary Time-Dependent Toroidal Sources. J. Phys. A 28, 4565 (1995).
- 13 N. Papasimakis, V. A. Fedotov, V. Savinov, T. A. Raybould, N. I. Zheludev, Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space. Nat Mater. 15(3) (2016).
- 14 Y. W. Huang et al., Toroidal lasing spaser. Sci. Rep. 3, 1237 (2013).
- 15 J. S. Toterogongora, A. E. Miroshnichenko, Y. S. Kivshar & A. Fratalocchi, Anapole nanolasers for mode-locking and ultrafast pulse generation. Nature Communications 8, 15535 (2017).
- 16 N. A. Nemkov, A. A. Basharin & V. A. Fedotov, Nonradiating sources, dynamic anapole and Aharonov-Bohm effect. Physical Review B, 95(16) (2017).
- 17 N. A. Nemkov, I. V. Stenishchev, A. A. Basharin, Nontrivial nonradiating all-dielectric anapole. Scientific Reports 7, 1064 (2017).
- 18 A. E. Miroshnichenko, A. B. Evlyukhin, Y. F. Yu, R. M. Bakker, A. Chipouline, A. I. Kuznetsov, B. Luk'yanchuk, B. N. Chichkov and Y. S. Kivshar, Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles. Nat. Commun. 6, 8069 (2015).
- 19 A. Ceulemans & L. F. Chibotaru, Molecular anapole moments. Phys. Rev. Lett. 80, 1861–1864 (1998).
- 20 E. A. Marengo & R. W. Ziolkowski, Nonradiating sources, the Aharonov-Bohm effect and the question of measurability of electromagnetic potentials. Radio Sci. 37, 10–19 (2002).
- 21 J. S. Toterogongora, A. E. Miroshnichenko, Y. S. Kivshar & A. Fratalocchi, Anapole nanolasers for mode-locking and ultrafast pulse generation. Nat. Commun. 8, 15535 (2017).
- 22 S. D. Liu, Z. X. Wang, W. J. Wang, J. D. Chen, Z. H. Chen, High Q-factor with the excitation of anapole modes in dielectric split nanodisk arrays. Opt. Express 25, 22375–22387 (2017).
- 23 T. Raybould, V. A. Fedotov, N. Papasimakis, I. Youngs, N. I. Zheludev, Exciting dynamic anapoles with electromagnetic doughnut pulses. Appl. Phys. Lett. 111 (2017).
- 24 B. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Dominguez, A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, Y. S. Kivshar, Suppression of scattering for small dielectric particles: anapole mode and invisibility. Philos. T. R. Soc. A 375 (2017).
- 25 B. Zel'dovich, Electromagnetic interaction with parity violation. Sov. Phys. JETP, 6, 1184 (1958).
- 26 A. J. Devaney and E. Wolf, Radiating and nonradiating classical current distributions and the fields they generate. Phys. Rev. D 8, 1044–1047 (1973).

- 27 I. Fernandez-Corbaton, S. Nanz and C. Rockstuhl, On the dynamic toroidal multipoles from localized electric current distributions. *Sci. Rep.* 7, 1–8 (2017)
- 28 R. Alaee, C. Rockstuhl, I. Fernandez-Corbaton, An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation. *Optics Communications*, 407, 17-21 (2018)
- 29 ANSYS HFSS at www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss.
- 30 E. E. Radescu, G. Vaman, Exact calculation of the angular momentum loss, recoil force, and radiation intensity for an arbitrary source in terms of electric, magnetic, and toroid multipoles. *Physical Review E* 65, 046609(2002).
- 31 <https://www.keysight.com>
- 32 A. E. Miroshnichenko, A. B. Evlyukhin, Y. F. Yu, R. M. Bakker, A. Chipouline, A. I. Kuznetsov, B. Luk'yanchuk, B. N. Chichkov and Y. S. Kivshar, Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles. *Nat. Commun.* 6, 8069 (2015).
- 33 B. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Domínguez, A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko and Y. S. Kivshar, Hybrid anapole modes of high-index dielectric nanoparticles. *Phys. Rev. A* 95, 063820 (2017).
- 34 Y. Yang, S. I. Bozhevolnyi, Nonradiating anapole states in nanophotonics: from fundamentals to applications. *Nanotechnology* 30, 20 (2019).
- 35 A. Alu and N. Engheta, Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings. *Phys. Rev. E* 72(1), 016623 (2005).
- 36 P. -Y. Chen and A. Alu, Mantle cloaking using thin patterned metasurfaces. *Phys. Rev. B* 84, 205110 (2011).
- 37 M. Selvanayagam, G. V. Eleftheriades, An active electromagnetic cloak based on the equivalence principle. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 1226-1229 (2012).
- 38 G. Labate, A. Alu, L. Matekovits, Surface-admittance equivalence principle for nonradiating and cloaking problems. *Phys. Rev. A* 95, 063841 (2017).
- 39 G. Labate, L. Matekovits, Invisibility and cloaking structures as weak or strong solutions of Devaney-Wolf theorem. *Optics Express* 24(17), 19245 - 19253 (2016).
- 40 A. Buzady et al. Refractive Index and Absorption Coefficient of Undoped and Mg-Doped Lithium Tantalate in the Terahertz Range. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* 38, 963–971 (2017).
- 41 M. G. Silveirinha, A. Alu & N. Engheta, Cloaking mechanism with antiphase plasmonic satellites. *Phys. Rev. B* 78, 205109 (2008).
- 42 A. Alu & N. Engheta, Cloaking a Sensor. *Phys. Rev. Lett.* 102, 233901 (2009).
- 43 S. E. Harris, Electromagnetically Induced Transparency. *Phys. Today* 50(7), 36 (1997).

- 44 N. Papasimakis, V. A. Fedotov, N. I. Zheludev and S. L. Prosvirnin, Metamaterial Analog of Electromagnetically Induced Transparency, *Phys. Rev. Lett.* 101, 253903 (2008).
- 45 B. Luk'yanchuk, N. I. Zheludev, S. A. Maier, N. J. Halas, P. Nordlander, Harald Giessen & Chong Tow Chong, The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials, *Nature Materials* 9, 707–715 (2010).
- 46 S. Zhang, D. A. Genov, Y. Wang, M. Liu and X. Zhang, Plasmon-Induced Transparency in Metamaterials. *PRL* 101, 047401 (2008).
- 47 P. Tassin, L. Zhang, R. Zhao, A. Jain, T. Koschny, C. M. Soukoulis, Electromagnetically Induced Transparency and Absorption in Metamaterials: The Radiating Two-Oscillator Model and Its Experimental Confirmation. *Phys. Rev. Lett.* 109(18), 187401 (2012).
- 48 N. Papasimakis and N. I. Zheludev, Metamaterial-Induced Transparency: Sharp Fano Resonances and Slow Light. *Opt. Photon. News* 20(10), 22(2009).
- 49 J. Melngailis, Focused ion beam technology and applications. *J. Vac. Sci. Technol. B* 5 (2), 469–495 (1987).
- 50 Lucille A. Giannuzzi, F. A. Stevie, Introduction to focused ion beams: Instrumentation, theory, techniques, and practice. New York: Springer (2005).
- 51 Andrei Andryieuski, Svetlana M. Kuznetsova, Sergei V. Zhukovsky, Yuri S. Kivshar & Andrei V. Lavrinenko, Water: Promising Opportunities For Tunable All-dielectric Electromagnetic Metamaterials. *Sci. Rep.* 5, 13535 (2015)
- 52 <https://www.cst.com>