

На правах рукописи

ОДИТ Михаил Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ИЗОТРОПНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Вендик Ирина Борисовна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Григорьев Андрей Дмитриевич
кандидат физико-математических наук,
Белов Павел Александрович

Ведущая организация: ОАО «НИИ «Феррит-Домен»

Защита состоится 29 июня 2010 г. в 15:30 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 25 » мая 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

_____ Е.А. Смирнов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОТРОПНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Введение

Развитие телекоммуникационных технологий требует разработки и проектирования новых типов СВЧ-компонентов, обладающих более совершенными характеристиками (новые функциональные возможности, массогабаритные показатели, себестоимость компонентов). Требования, предъявляемые к современным СВЧ-устройствам, приводят к необходимости разработки инновационных типов материалов, в частности, искусственных, которые не имеют аналогов среди материалов, существующих в природе. Необходимость разработки материалов с уникальными свойствами привела к стремительному развитию области электродинамики, получившей название науки о метаматериалах. Метаматериалы – это искусственные материалы с волновыми свойствами, которых нет в природе. Определение метаматериалов относится ко всему диапазону частот колебаний различной природы – от низкочастотных акустических до СВЧ- и колебаний оптического диапазона.

Метаматериалы состоят из элементов различной геометрии, образующих регулярную структуру. Порядок, состав, расположение и форма элементов, из которых состоит метаматериал, определяют уникальные волновые (в частности, электродинамические) свойства структуры в целом. Опираясь на эти параметры, можно создавать искусственные материалы с регулируемыми свойствами, не характерными для исходных образующих их элементов. Наиболее часто в качестве программируемых свойств метаматериала формируют отрицательные эффективные (усредненные по всему объему структуры) диэлектрическую и магнитную проницаемости искусственной структуры.

В данной диссертационной работе рассматриваются метаматериалы, разрабатываемые для микроволнового частотного диапазона. Выбранная частотная область ограничена значениями 1-100 ГГц, которая используется в различных видах устройств связи. В этой области частот возможно создание таких инновационных устройств как суперлинзы, маскирующие слои, идеальные магнитные стенки, сверхпоглотители и др. Кроме того, использование своего рода «метаматериального» подхода к расчету традиционных СВЧ-устройств (фильтров, фазовращателей и др.) позволяет создавать эти устройства с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями.

Несмотря на интенсивное развитие электродинамики метаматериалов, все еще существует некоторая однотипность в подходе к разработке метаматериальных структур. Во-первых, большая часть предложенных моделей метаматериалов – это структуры, где только диэлектрическая или только магнитная эффективные проницаемости отрицательны. В то же время, наиболее интересными свойствами (отрицательная рефракция, фокусировка и др.) обладают такие искусственные среды, где оба параметра принимают одновременно отрицательные значения. Во-вторых, как правило, для формирования отрицательных

проницаемостей используют металлические резонансные частицы различной формы. При этом в большей части работ по метаматериалам рассматриваются одномерные или двумерные анизотропные структуры. В то же время, для разработки линз из метаматериалов, маскирующих слоев, или же устройств, в которых используется отрицательное преломление на границе метаматериала, зачастую необходимо использование объемных трехмерных структур, обладающих изотропией свойств. На данный момент большая часть попыток сформировать объемный изотропный метаматериал сводится к размножению различных типов плоских металлических резонаторов в трех ортогональных плоскостях. Недостатком этого метода является сложная геометрия резонаторов, которая влияет на изотропию свойств и усложняет процесс производства резонаторов. В то же время, в качестве резонансных компонентов в составе метаматериала естественным образом могут использоваться диэлектрические резонаторы, лишенные указанных недостатков. Использование диэлектрических резонаторов в метаматериалах слабо освещено в современной литературе.

В данной работе исследуется модель изотропного метаматериала в виде регулярной среды, состоящей из диэлектрических резонаторов сферической формы, характеризующегося одновременно отрицательными значениями эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Два типа сферических резонаторов, различающихся размерами, упорядочены в пространственную кубическую решетку класса симметрии $m\bar{3}m$, что определяет изотропию свойств объемного образца.

Актуальность диссертационной работы определяется тем, что рассматривается перспективная, быстро развивающаяся область электродинамики, в которой выделена проблема, касающаяся слабо изученных изотропных метаматериалов, состоящих из диэлектрических резонаторов.

Целью диссертационной работы является исследование электродинамических параметров изотропного метаматериала на основе решетки диэлектрических резонаторов, включающее анализ и выбор структуры пространственной упаковки сферических резонаторов, электродинамическое моделирование объемной структуры метаматериала, экспериментальное исследование образцов сферических резонаторов, а также анализ иных возможных вариантов реализации изотропного метаматериала.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1. Анализ модели решетки сферических диэлектрических резонаторов двух разных размеров в условиях возбуждения электрического и магнитного диполей без учета взаимодействия.
2. Определение типа пространственной упаковки резонаторов в изотропном метаматериале, обуславливающей проявление отрицательного коэффициента преломления в наиболее широкой полосе частот.
3. Определение ограничений на значения диэлектрической проницаемости и уровня потерь диэлектрического материала сферических резонаторов разного размера в составе однородной среды, проявляющей свойства метаматериала.
4. Экспериментальное исследование резонансного отклика сферических

диэлектрических резонаторов для двух основных типов колебаний (магнитного и электрического).

5. Численное моделирование метаматериала, образованного регулярной решеткой сильно связанных взаимодействующих друг с другом диэлектрических резонаторов.

Объектами исследования являются одиночные диэлектрические резонаторы сферической формы; периодическая структура на основе двух типов сферических резонаторов, различающихся размерами; структура из связанных, близко расположенных сферических резонаторов.

Основные методы исследования:

а) теоретические: аналитические и численные методы электродинамического моделирования;

б) экспериментальные – измерение коэффициентов отражения и передачи электромагнитной волны в условиях резонанса сферического диэлектрического резонатора, помещенного в прямоугольный волновод.

Научные положения:

1. Изотропный метаматериал на основе сферических диэлектрических резонаторов двух разных размеров обладает наиболее широкой частотной полосой отрицательных значений коэффициента преломления в случае упаковки резонаторов в гранецентрированную кубическую решетку.

2. Минимальное значение относительной диэлектрической проницаемости материала сферических резонаторов двух разных размеров, упорядоченных в кубическую решетку для формирования изотропного метаматериала, должно превышать значение 100.

3. Ширина частотного диапазона, в котором эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости метаматериала на основе диэлектрических резонаторов отрицательны, ограничена потерями в материале резонаторов.

4. Двумерная решетка диэлектрических сферических резонаторов с электрической связью на частотах резонансных колебаний H_{111} -типа, обладает отрицательной дисперсией.

Новые научные результаты работы.

1) Выполнен анализ и предложен тип упаковки диэлектрических резонаторов двух разных размеров в решетку типа $m3m$, обеспечивающий наибольшую ширину рабочей частотной полосы изотропного метаматериала.

2) Предложен аналитический метод расчета параметров материала, используемого для формирования исследуемого изотропного метаматериала. Проведена оценка влияния девиации параметров диэлектрических резонаторов (диэлектрической проницаемости и размеров) на их резонансную частоту.

3) Выполнено электродинамическое численное моделирование элементарной ячейки метаматериала. Извлечение электродинамических параметров из результатов численного моделирования подтверждает корректность описания исследуемой структуры в терминах эффективных отрицательных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей. Получены дисперсионные кривые метаматериала, подтверждающие наличие в рассматриваемой структуре обратной волны.

4) Измерены резонансные характеристики сферических диэлектрических резонаторов. Проведен сравнительный анализ двух типов резонансов в диэлектрических резонаторах, резонирующих на электрической и магнитной модах. Показано, что резонансный отклик колебаний E_{111} -типа имеет меньшую амплитуду, чем отклик колебаний H_{111} -типа.

5) Выполнено численное моделирование искусственного материала на основе взаимодействующих диэлектрических резонаторов.

6) Проведен анализ влияния неупорядоченности пространственной структуры сильно связанных резонаторов на ее волновые характеристики.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Сформулированы рекомендации по формированию оптимальной пространственной структуры изотропного метаматериала с максимальной плотностью упаковки частиц. Определена область ограничений на значения параметров диэлектрика (ϵ и $\text{tg } \delta$), используемого для формирования однородного изотропного метаматериала. Результаты работы могут быть использованы при разработке изотропного искусственного материала с отрицательной дисперсией на основе сферических диэлектрических резонаторов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

На международных конференциях: конференции «Days on Diffraction» в 2006, 2007, 2008, 2009г; международная конференция по метаматериалам и специальным материалам для применения в технике СВЧ и телекоммуникациях в 2006г; международный студенческий семинар «Microwave and Optical applications of novel physical phenomena» в 2006, 2007, 2008г; 11th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT-2007); ELECTROCERAMICS XI, Manchester, UK, 1-3 September 2008; 1st and 2nd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Rome, 22-26 October 2007 and 24-26 September 2008, Pamplona, Spain); 3th and 4th Workshop on Metamaterials and special materials for electromagnetic applications and TLC (Rome, Italy, 31 March 2007 and Naples, Italy, December 18 - 19, 2008), Progress In Electromagnetics Research Symposium, 18–21 августа, Москва, 2009.

На конференциях: XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС – XVIII) 2008г; семинары профессорско-преподавательского состава СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» 2006, 2007, 2008, 2010 г.

Работа выполнена при поддержке международного проекта «Метаморфоза» 6-й рамочной программы Европейского Союза, а также инновационного образовательного проекта СПб ГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 20 работах, из которых 5 – публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 статья в другом издании, 1 глава в книге, и 13 работ в материалах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав с введениями и заключениями, 2 приложений и списка литературы, включающего 100 наименований. Основная часть работы изложена на 127 страницах машинописного текста. Работа содержит 76 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертации. Сформулирована научная новизна, практическая значимость полученных в работе результатов и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертации. В главе кратко упоминается история возникновения отдельного направления электродинамики, изучающего метаматериалы, рассматриваются основные свойства метаматериалов. Далее рассматриваются различные структуры метаматериалов, описанные в современной литературе. Отмечается, что, несмотря на широкий спектр всевозможных структур метаматериалов, предложенных на сегодняшний день, недостаточно внимания уделено разработке искусственных сред с одновременно отрицательными электромагнитными параметрами, обладающих изотропией свойств и реализованных на диэлектрических резонансных включениях.

Во второй главе диссертации рассматривается структура трехмерного изотропного метаматериала на основе сферических диэлектрических резонаторов (рис. 1, а). Резонаторы изготовлены из материала с высоким значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon_p > 100$), в то время как диэлектрическая проницаемость материала связующей матрицы имеет невысокое значение ($\epsilon_h = 1-2$). Это приводит к тому, что длина электромагнитной волны в матрице много больше, чем длина волны внутри частиц. На частотах, при которых длина волны внутри частиц становится соизмеримой с их размерами, наблюдается явление резонанса. Электромагнитные колебания внутри сферических резонаторов соответствуют двум типам: магнитному H_{111} и электрическому E_{111} (рис. 1, б). Диаметры частиц выбраны таким образом, что резонансы обоих типов возникают в частицах разного радиуса на одной и той же частоте. Колебания электрического типа наблюдаются в частицах большего радиуса, а магнитного – в частицах меньшего радиуса.

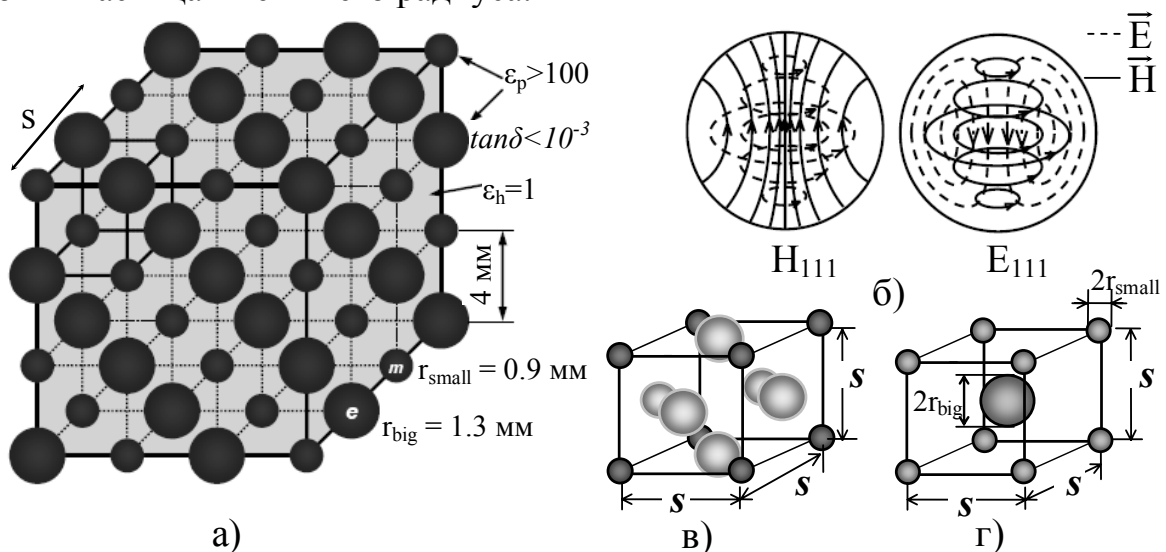


Рис. 1. а) Изотропный метаматериал на основе диэлектрических резонаторов сферической формы. r_{big} и r_{small} – радиусы сферических частиц большего и меньшего радиусов, соответственно; б) H_{111} -мода (слева) и E_{111} -мода (справа); в) элементарная ячейка гранецентрированной структуры; г) элементарная ячейка объемно-центрированной структуры.

Поскольку расстояние между частицами много меньше длины волны в материале матрицы, не следует ожидать резонансных явлений, связанных с дифракцией волны на периодической решетке, как это происходит в фотонных кристаллах. Колебательные моды H_{111} и E_{111} по отношению к полям в матрице образуют магнитный и электрический дипольные моменты. Резонансные явления в рассматриваемой структуре определяют ее эффективные диэлектрическую и магнитную проницаемости. В частотной области несколько выше резонансных частот H_{111} и E_{111} типов колебаний вклад дипольных моментов резонирующих частиц в эффективную проницаемость структуры становится отрицательным. При этом в ограниченном частотном диапазоне усредненная диэлектрическая и магнитная проницаемости структуры одновременно становятся отрицательными. Такая среда обладает отрицательным эффективным коэффициентом преломления ($n_{\text{eff}} < 0$).

В работе рассматриваются три возможных типа упаковки резонансных частиц: структура типа NaCl, когда большие и малые резонаторы занимают в пространстве такие же места, как ионы Na и Cl в кристаллической ячейке NaCl (см. рис. 1, а); гранецентрированная кубическая решетка (рис. 1, в); объемноцентрированная кубическая решетка (рис. 1, г). Решетки отличаются плотностью упаковки резонаторов (количеством резонаторов в единичной ячейке структуры). В то же время, все три структуры относятся к высшему классу симметрии $m\bar{3}m$. В таком классе симметрии тензоры второго ранга для всех физических параметров имеют диагональный вид, и при этом диагональные элементы одинаковы. Это обуславливает изотропию эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей в данной структуре.

Для того чтобы рассчитать эффективную проницаемость среды, решается электродинамическая задача дифракции плоской волны на сферической частице. При этом в рассмотрение берутся только отдельно взятые резонаторы большего или меньшего радиуса в ограниченном пространстве материала диэлектрической матрицы. В общем случае результат вычисления для одной частицы и для ансамбля частиц будет давать разные значения (согласно теории поляризации диэлектриков). В первом приближении влияние соседних частиц друг на друга не рассматривается. Такое допущение справедливо для метаматериала конечного размера, состоящего из частиц с большим значением диэлектрической проницаемости, достаточно удаленных друг от друга. При более строгом рассмотрении задачи, расчет эффективных параметров среды требует также учета взаимодействия резонаторов. Для этого можно воспользоваться известными выражениями Клаузиуса-Мосотти или Лоренц-Лоренца.

Электрический дипольный момент сферической частицы, ориентированный по направлению вектора электрического поля падающей плоской волны и магнитный дипольный момент сферической частицы, ориентированный вдоль направления вектора магнитного поля волны, определяются выражениями:

$$p_x = \varepsilon_0 \varepsilon_p \int_{V_{sph, big}} \left[\vec{E}^{(in)}(\varphi, \theta, r) - \vec{E}^{(ext)}(\varphi, \theta, r) \right] \vec{e}_x dv, \quad (1)$$

$$m_y = \mu_0 \mu_p \int_{V_{sph, small}} \left[\vec{H}^{(in)}(\varphi, \theta, r) - \vec{H}^{(ext)}(\varphi, \theta, r) \right] \vec{e}_y dv, \quad (2)$$

где $\vec{E}^{(in)}$, $\vec{E}^{(ext)}$ и $\vec{H}^{(in)}$, $\vec{H}^{(ext)}$ – напряженности соответственно электрического и магнитного полей внутри (*in*) и вне (*ext*) частицы, ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства, ε_h и μ_h – диэлектрическая и магнитная проницаемости диэлектрической матрицы, ε_p и μ_p – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала сферической частицы.

В изотропной среде или в среде с кубической симметрией эффективная относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды определяются выражениями:

$$\varepsilon_r^{(eff)}(\omega) = \frac{p_x(\omega)}{s^3 \varepsilon_0 E_0} + \varepsilon_h, \quad (3)$$

$$\mu_r^{(eff)}(\omega) = \frac{m_y(\omega)}{s^3 E_0 \frac{k_1}{\omega}} + \mu_h, \quad (4)$$

где ω – круговая частота, s^3 – объем элементарной ячейки, содержащей резонатор, k_1 – волновое число в материале резонаторов.

Подставляя (1) и (2) соответственно в (3) и (4) и интегрируя электромагнитные поля в объеме сферического резонатора, получим следующие выражения:

$$\varepsilon_{eff}(f) = L_\varepsilon \frac{1}{s^3} \varepsilon_p \frac{3}{2} I(f, r_{big}) \cdot b^{(t)}(f, r_{big}) + \varepsilon_h, \quad (5)$$

$$\mu_{eff}(f) = L_\mu \frac{1}{s^3} \sqrt{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_h}} \frac{3}{2} I(f, r_{small}) \cdot a^{(t)}(f, r_{small}) + \mu_h, \quad (6)$$

Где r_{small} и r_{big} – радиусы сферических частиц, $r_{big} > r_{small}$ (радиусы частиц определяются из равенства резонансных частот колебаний H_{111} и E_{111} типов для малой и большой частиц соответственно), f – частота электромагнитной волны, $I(f, r)$ – аппроксимационная функция, полученная в результате интегрирования электромагнитных полей в объеме частицы, $L_{\varepsilon, \mu}$ – коэффициент, который зависит от типа упаковки резонаторов: $L_\varepsilon = 0.5, 0.35, 0.65$ и $L_\mu = 0.5, 0.65, 0.65$ для решетки типа NaCl, объемно-центрированной и гранецентрированной решеток соответственно, $a^{(t)}$, $b^{(t)}$ – сферические волновые функции.

Относительные проницаемости рассчитаны исходя из условия, что минимальное расстояние между ближайшими резонаторами во всех трех рассматриваемых структурах одинаково. Резонанс колебаний E_{111} -типа имеет бóльшую добротность, чем резонанс колебаний H_{111} -типа, поэтому ширина частотной области с отрицательной диэлектрической проницаемостью всегда меньше, чем области с отрицательной магнитной проницаемостью. Это подтверждается расчетами в частотном диапазоне 1-100 ГГц. Поэтому плотность упаковки больших частиц считается приоритетной, т.к. резонанс электрического типа в этих частицах вносит меньший вклад в формирование эффективной диэлектриче-

ской проницаемости среды, по сравнению с вкладом резонанса магнитного типа. В рассматриваемых решетках этому требованию удовлетворяет именно границентрированная кубическая, в которой на одну элементарную ячейку структуры приходится максимальная плотность больших резонаторов.

На рис. 2 изображены частотные зависимости эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей для трех типов пространственных упаковок резонаторов. Границентрированная кубическая решетка характеризуется наиболее широкой частотной полосой, в которой проявляются отрицательные значения эффективной диэлектрической проницаемости. Это же справедливо и для отрицательного коэффициента преломления для данной структуры.

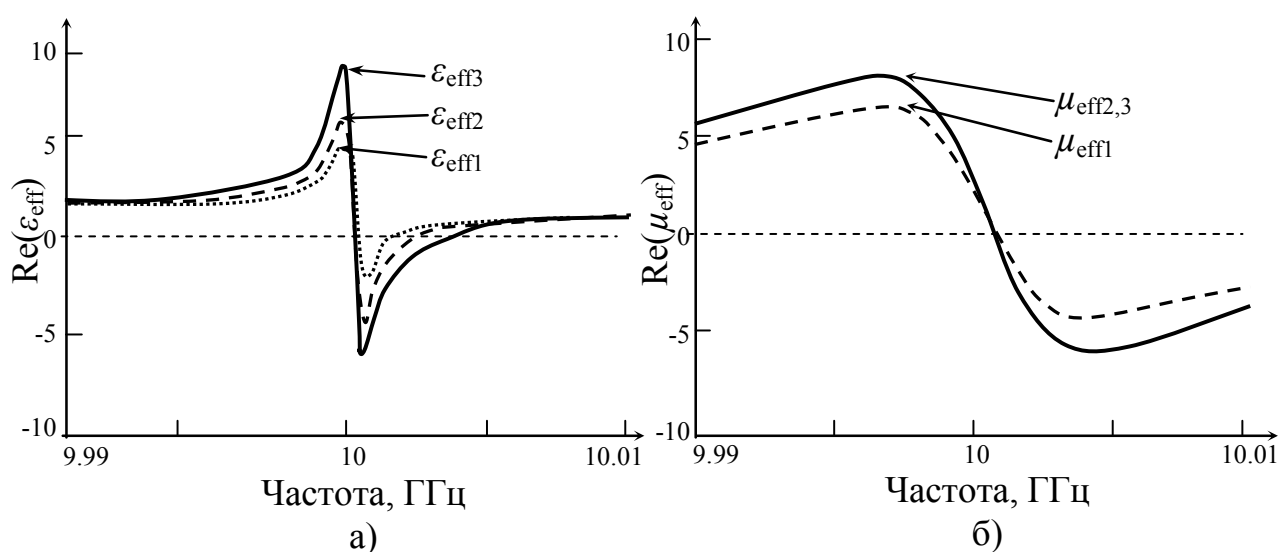


Рис. 2. Эффективные диэлектрическая (а) и магнитная (б) проницаемости для различных типов упаковок резонансных частиц. Индексом 1 обозначена структура типа NaCl, 2 – объемно-центрированная кубическая, 3 - границентрированная кубическая.

Важной проблемой является оценка параметров материала сферических резонаторов, которые используются для формирования изотропного метаматериала. Расчет эффективных параметров (диэлектрической и магнитной проницаемостей) метаматериала возможен при условии, что рассматриваемая среда является однородной по отношению к распространяющейся в ней электромагнитной волне. Среда считается однородной, если период структуры (расстояние между повторяющимися элементами, из которых состоит метаматериал) много меньше длины распространяющейся в ней волны. В качестве максимально возможного значения периода структуры принято расстояние, равное четверти длины волны в материале матрицы. Период структуры, кроме того, ограничен минимальным значением, которое определяется размерами резонаторов. Для трех рассматриваемых типов упаковки резонаторов справедливо утверждение, что минимальное значение периода должно превышать суммы диаметров большого и малого резонаторов (это значение достигается, если резонаторы расположены вплотную друг к другу). Совокупность указанных ограничений на период описывается следующим выражением:

$$2(r_{\text{small}} + r_{\text{big}}) < s < \lambda / 4 \quad (7)$$

Эмпирически полученные размеры резонаторов в условиях соответствующих резонансов: $r_{small} \approx \lambda_{sp} / 2$ и $r_{big} \approx \lambda_{sp} / 1.4$, где λ_{sp} - длина волны в резонаторе. Выражая длины волн через относительную диэлектрическую проницаемость материала сферических резонаторов ϵ_p и матрицы ϵ_h , определим параметр δ_s , характеризующий разницу между максимальным и минимальным возможными значениями периода структуры:

$$\delta_s = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_h}} - 2\left(\frac{c}{f\sqrt{\epsilon_p}} \frac{1}{2} + \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_p}} \frac{1}{2 \cdot 0.7}\right), \quad (8)$$

где c – скорость света, f – резонансная частота.

Приравняв δ_s к нулю, получим уравнение для определения минимально возможного значения диэлектрической проницаемости резонаторов, при котором структура метаматериала физически реализуема, т.е. когда частицы расположены вплотную, и условие однородности по отношению к волне в матрице все еще сохраняется: $\epsilon_{p\ min} = 94 \epsilon_h \approx 100 \epsilon_h$. Обратимся к рис. 3, на котором изображена зависимость параметра δ_s от диэлектрической проницаемости частиц, для трех значений выбранной рабочей резонансной частоты f .

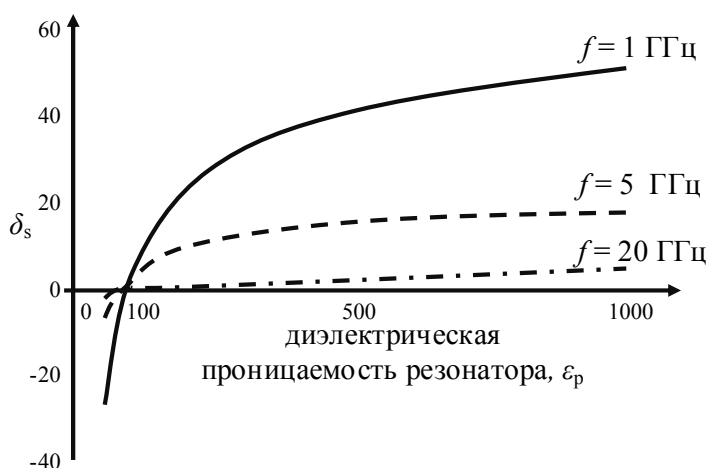


Рис. 3. Зависимость разности между максимальным и минимальным значениями периода структуры s от диэлектрической проницаемости частиц, $\delta_s(\epsilon_p)$ для трех значений выбранной рабочей резонансной частоты f , $\epsilon_h = 1$.

Анализ графика показывает, что все кривые пересекаются в одной точке. Она соответствует минимальному значению диэлектрической проницаемости материала резонаторов, при котором структура метаматериала физически реализуема, т.е. при которой минимальное и максимальное значения периода структуры равны. Если принять ϵ_h равным единице, то минимальное значение диэлектрической проницаемости материала сферических резонаторов приблизительно будет равняться 100.

Ширина частотного диапазона с одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей определяется шириной диапазона, в котором $\epsilon_{eff} < 0$, и который в рассматриваемой частотной области всегда будет более узким, чем диапазон, в котором $\mu_{eff} < 0$. Изобразим зависимость относительной ширины диапазона с $\epsilon_{eff} < 0$ от потерь в материале сферических резонаторов и от их диэлектрической проницаемости (рис. 4). Кривые на рис. 4 справедливы для значений резонансных частот в диапазоне 1-100 ГГц.

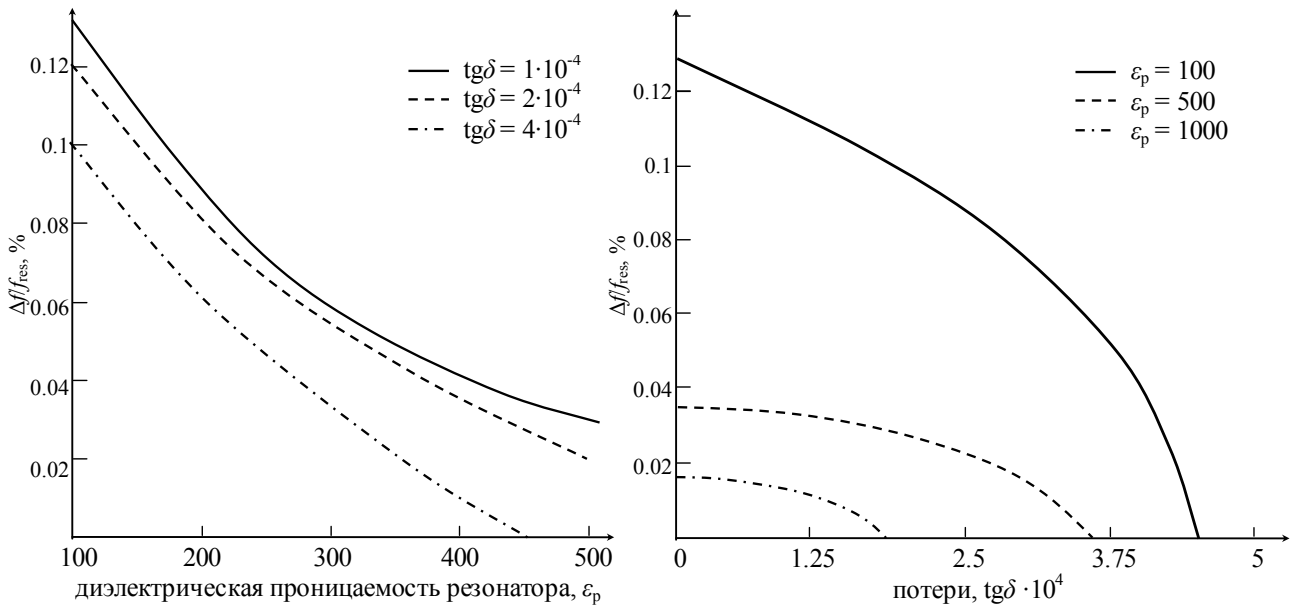


Рис. 4. Зависимость относительной ширины частотного диапазона с $\varepsilon_{\text{eff}} < 0$ от а) диэлектрической проницаемости сферических резонаторов ε_p и б) потерь в материале резонаторов.

Как видно из рис. 4, а, наибольшей шириной частотного диапазона с отрицательной эффективной диэлектрической проницаемостью обладает искусственный материал, изготовленный из резонаторов с наименьшей диэлектрической проницаемостью (ограниченной значением 100 по изложенным выше соображениям). В то же время, анализ рис. 4, б показывает, что для каждого значения ε_p существует предельный уровень потерь в материале резонаторов, при превышении которого относительная ширина частотного диапазона уменьшается до нулевого значения. Чем меньше диэлектрическая проницаемость резонатора, тем меньшим будет предельный уровень потерь. Для резонаторов с $\varepsilon_p = 100$ максимальный уровень потерь $\text{tg}\delta = 4.5 \cdot 10^{-4}$.

Численное моделирование исследуемой структуры выполнялось с помощью программного продукта CST Microwave Studio. Объектом моделирования являлась периодическая структура конечных размеров, состоящая из двух типов сферических резонаторов. В качестве граничных условий использовались идеальные магнитные и электрические стенки, расположенные попарно на противоположных гранях (рис. 5, а). На рис. 5, б, отображены результаты расчета коэффициентов отражения и передачи моделируемой структуры. Затемненная область отвечает диапазону частот, где в обоих типах сферических частиц одновременно возникают резонансы. Моделирование отдельно взятых больших или малых частиц показывает в этой области резонанс в виде провала на коэффициенте передачи. В случае моделирования двухкомпонентной структуры, в области совпадения резонансных частот наблюдается диапазон прохождения электромагнитной волны. Эти явления можно объяснить в терминах материальных параметров искусственной среды. Из выражения для волнового вектора $k = \omega \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\mu}$ следует, что если только диэлектрическая или только магнитная проницаемости среды отрицательны, волновой вектор принимает мнимое значение, и, следовательно, электромагнитная волна в такой среде не распространяется. Если же проницаемости одновременно принимают отрицательные зна-

чения, волновой вектор будет отрицательным, но действительным. В таком случае волна в среде распространяется, а ее фазовая и групповая скорости противоположно направлены. Наличие обратной волны также подтверждается анализом перемещения фронта волны в структуре с течением времени и построением дисперсионных кривых, полученных в результате численного моделирования (рис. 6).

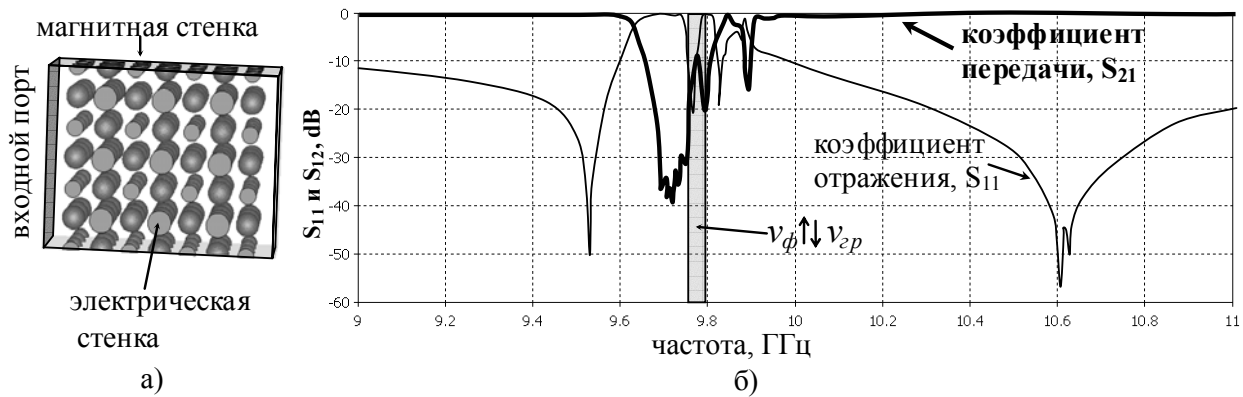


Рис. 5. а) объемная структура моделируемого метаматериала; б) коэффициенты отражения и передачи моделируемой структуры. Серым цветом обозначена область частотного диапазона, где фазовая и групповая скорости волны имеют противоположные направления. Параметры структуры: $\epsilon_p = 200$, $\epsilon_h = 1$, $\mu_p = 1$, $\mu_h = 1$, $\text{tg}\delta = 10^{-4}$, $r_{small} = 1$ мм, $r_{big} = 1.5$ мм, $s = 7$ мм.

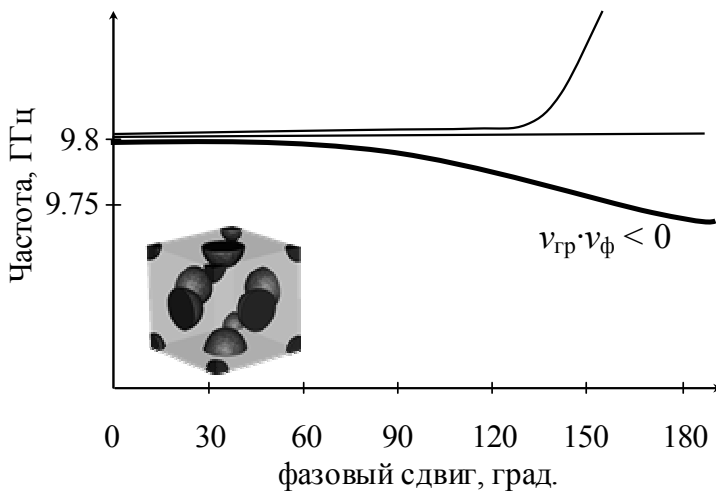


Рис. 6. Дисперсионные кривые для элементарной ячейки структуры, изображенной в левой части рисунка. Граничные условия со всех сторон - периодические. Жирной линией выделена дисперсионная кривая, характеризующая тип поля с противоположным направлением фазовой и групповой скоростей.

В **третьей главе** описывается экспериментальное исследование сферических резонаторов. В качестве материала для изготовления диэлектрических резонаторов используется сегнетокерамика с высоким значением диэлектрической проницаемости и низкими потерями в СВЧ-диапазоне. Для проведения экспериментов был использован сегнетоэлектрик на основе керамики $\text{BaO-SrO-Nd}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_p = 400$. Изготовленные из исходного материала сферические частицы помещались в центральную часть металлического волновода с размерами 16.8 мм на 7.9 мм, подключенного к анализатору цепи Agilent 8720ES. В эксперименте измерялся коэффициент отражения и передачи одного и пары сферических резонаторов в волноводе. Результаты измерений приведены на рис. 7.

Эксперимент показал наличие резонанса колебаний H_{111} -типа на частоте 17,2 ГГц для меньшей частицы и колебаний E_{111} -типа на частоте 16,8 ГГц для

большой частицы. Оба измеренных резонанса хорошо совпадают с результатами электродинамического моделирования. Эксперимент и моделирование позволили сделать вывод, что резонанс электрического типа колебаний выражен слабо и плохо детектируется на фоне помех. Однако эксперименты с парой резонаторов в волноводе показали, что при минимальном отличии между радиусами резонаторов (не более 10 мкм), их суммарный резонансный отклик усиливается – его амплитуда увеличивается, и частотный диапазон резонанса (а, следовательно, и частотный диапазон области с отрицательными эффективными параметрами) расширяется. Таким образом, использование ансамбля частиц позволяет усилить эффект формирования искусственных отрицательных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

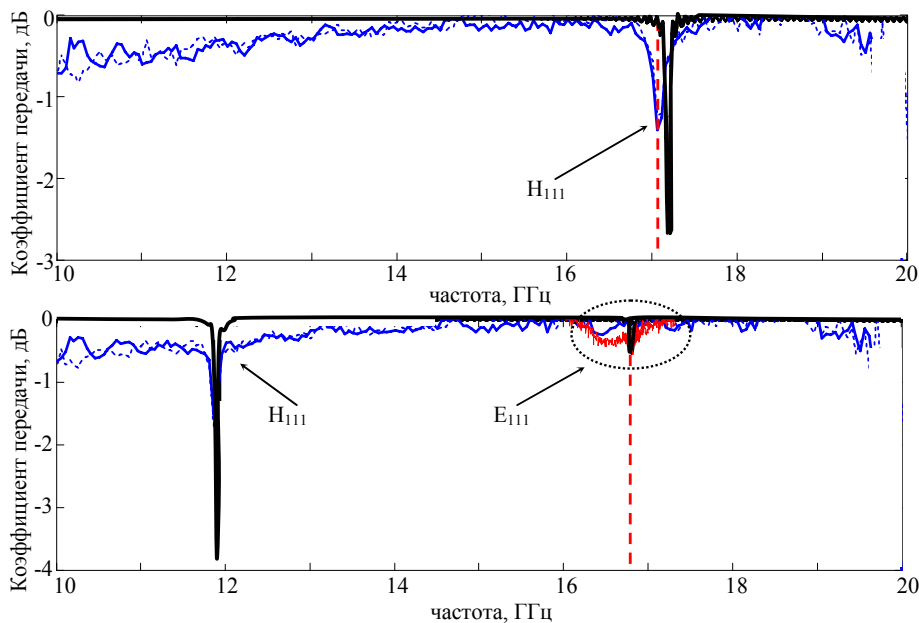


Рис 7. Коэффициент передачи для сферического резонатора с диаметром 0.9 мм (сверху) и 1.3 мм (снизу). Жирная линия отображает результаты электродинамического моделирования, тонкая сплошная и пунктирная – экспериментально измеренные коэффициенты передачи S_{12} и S_{21} .

В четвертой главе рассматривается структура, образованная близко расположенными, сильно взаимодействующими диэлектрическими резонаторами.

Первоначально анализировалась одномерная цепочка связанных сферических резонаторов (рис. 8). В качестве рабочей частоты была выбрана резонансная частота основной моды H_{111} , обеспечивающей генерацию магнитного диполя. Частицы с радиусом $r = 1$ мм были расположены на расстоянии $\Delta = 0,1$ мм. При таком их взаимном расположении соседние частицы начинают взаимодействовать друг с другом. Между близко расположенными диэлектрическими резонаторами возникает электрическая связь (см. рис. 8).

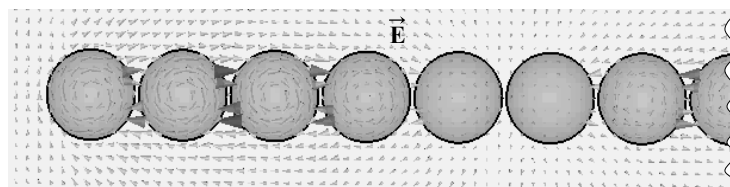


Рис 8. Одномерная цепочка связанных диэлектрических сферических резонаторов и линии напряженности электрического поля. $\epsilon_p = 400$, $r = 1$ мм, $\tan\delta = 10^{-4}$, $\Delta = 0,1$ мм.

Цепочка из таких резонаторов является дуальным аналогом цепочки колебательных контуров с индуктивной связью, в которой может существовать от-

рицательная дисперсия. Анализ распределения электромагнитного поля в одномерной цепочке для разных моментов времени показывает, что в условиях резонанса H_{111} -колебаний, в области пространства, в которой находятся резонаторы, направления фазовой и групповой скоростей противоположны.

Вторым этапом было электродинамическое моделирование двумерной структуры из близко расположенных сферических диэлектрических резонаторов.

Моделируемая структура состоит из 24 диэлектрических резонаторов, размещенных в одной плоскости. Частота резонанса магнитного типа для частиц радиуса 1 мм с диэлектрической проницаемостью 400 равна 7,2 ГГц. Если резонаторы расположены на большом расстоянии друг от друга (более 3 мм), резонанс проявляется в виде области запираания вблизи резонансной частоты (провал на коэффициенте передачи, рис. 9, а). Однако, как следует из рис. 9, б, в случае, когда сферические частицы расположены близко друг к другу, в области резонансной частоты наблюдается диапазон пропускания, заключенный между двумя пиками непропускания. Следует ожидать, что для данного частотного диапазона эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости моделируемой структуры отрицательны, а, значит, в среде присутствует обратная электромагнитная волна, направление распространения которой противоположно направлению распространения падающей плоской волны.

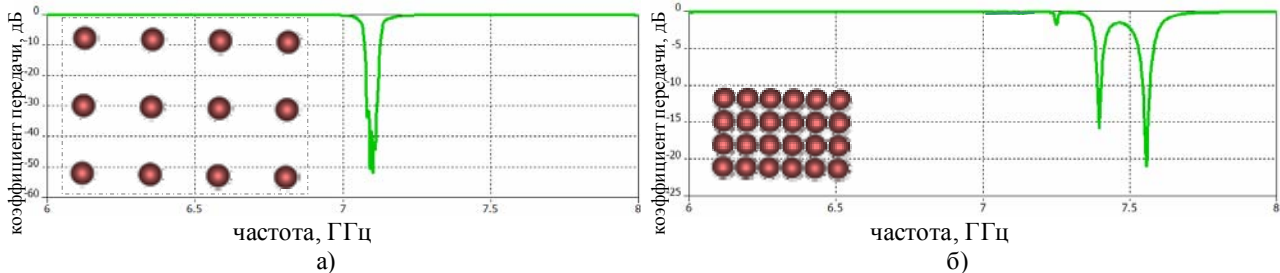


Рис. 9. Коэффициенты передачи для а) не взаимодействующих и б) близко расположенных связанных резонаторов.

На рис. 10 представлена картина распределения фазы поперечной составляющей напряженности магнитного поля электромагнитной волны в фиксированный момент времени. В левой части приведено распределение в среде без резонаторов. В правой части отображена фаза для структуры, содержащей массив сферических резонаторов. Как видно из рисунка, в плоскости диэлектрических резонаторов в направлении движения волны наблюдается изменение ее фазы от 180° до 360° , т.е. ее положительный прирост. Источник электромагнитной волны находится в левой части. Положительный прирост фазы в направлении распространения волны свидетельствует о том, что ее фазовая скорость отрицательна. Наличие обратной волны в такой структуре подтверждает, что среда проявляет свойства метаматериала с отрицательными значениями эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

В четвертой главе также рассматривается нерегулярная цепочка сферических резонаторов, в которой резонаторы расположены не периодически, а хаотично (но при этом на малых расстояниях, чтобы их взаимодействие сохрани-

лось). Электродинамическое моделирование такой цепочки показывает, что в целом эффект остается прежним и на коэффициенте передачи исследуемой структуры между двух пиков непропускания сохраняется диапазон прохождения электромагнитной волны. Это говорит о возможности упрощения физической реализации структуры метаматериала без нарушения его принципиальных свойств.

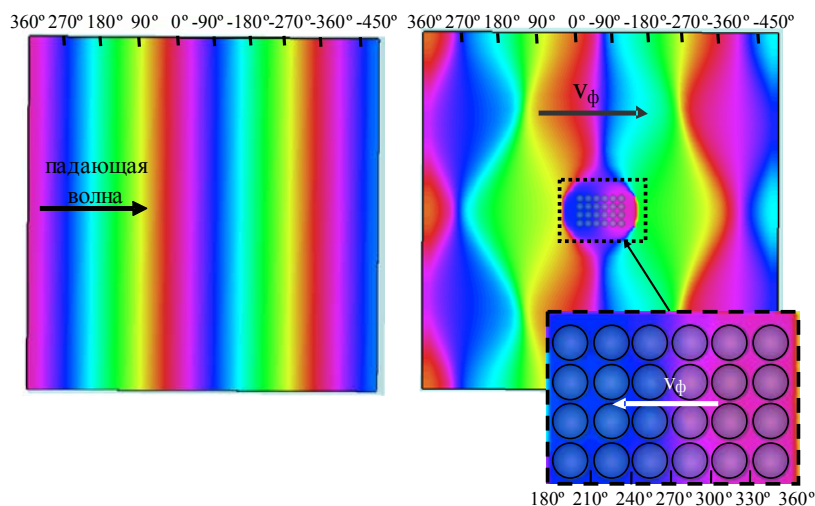


Рис. 10. Распределение фазы электромагнитной волны в свободном пространстве (слева) и в среде, содержащей двумерную структуру из взаимодействующих сферических резонаторов (справа).

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. На основе дифракционной модели выполнен анализ системы из больших и малых сферических резонаторов, резонирующих, соответственно, на частотах электрической и магнитной мод. Выполнен расчет эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей периодической решетки сферических резонаторов без учета и с учетом взаимодействия резонаторов.
2. Определена структура пространственной упаковки сферических резонаторов, обуславливающая проявление отрицательного коэффициента преломления метаматериала в наиболее широкой полосе частот.
3. Выполнен анализ влияния на резонансную частоту потерь в материале резонаторов, его диэлектрической проницаемости, а также размера резонансных частиц.
4. Выполнено численное моделирование структуры изотропного метаматериала на основе сферических диэлектрических резонаторов двух размеров, в условиях возбуждения колебаний электрического и магнитного типов на одной и той же резонансной частоте.
5. Показано, что исследуемая структура обладает отрицательной дисперсией при условии совпадения резонансных частот колебаний H_{111} и E_{111} у соответствующих резонаторов.
6. Изготовлена серия образцов сферических диэлектрических резонаторов и проведены эксперименты, подтверждающие корректность дифракционной модели.
7. Проведено электродинамическое моделирование метаматериала, состоящего из одинаковых, близко расположенных, взаимодействующих друг с другом сферических резонаторов. Показано, что исследуемая структура обладает отрицательной дисперсией на частоте низшего резонанса колебаний магнитного типа.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Vendik I. B. Isotropic artificial media with simultaneously negative permittivity and permeability (Искусственная изотропная среда с одновременно отрицательными коэффициентами диэлектрической и магнитной проницаемостей) [Текст] / I. B. Vendik, O. G. Vendik, M. A. Odit // *Microwave and Optical Technology Letters.*, vol. 48. – 2006. – P. 2553-2556.
2. Vendik I. B. Modeling of isotropic double negative media for microwave applications (Моделирование изотропного материала с отрицательными коэффициентами диэлектрической и магнитной проницаемостей для применения в микроволновой технике) [Текст] / I. B. Vendik, O. G. Vendik, M. A. Odit // *Opto-Electronics Review.* – 2006. – Vol. 14, num3. – P. 179-186.
3. Vendik I. 3D metamaterial based on a regular array of resonant dielectric inclusions (Трехмерный метаматериал на основе решетки регулярного массива резонансных диэлектрических включений) [Текст] / Vendik I., Odit M., Kozlov D. // *Radioengineering.* – 2009 – Vol. 18, No. 1, P. 1-7.
4. Vendik I. B. 3D isotropic metamaterial based on a regular array of resonant dielectric spherical inclusions (Трехмерный изотропный метаматериал из массива периодических резонансных включений) [Текст] / Vendik I.B., Odit M. A., Kozlov D. S. // *Metamaterials.* – 2009 – Vol. 3, Iss. 3-4. – P. 140-147.
5. Вендик И. Б. Изотропный метаматериал на основе сегнетокерамических сферических включений [Текст] / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, М.А. Одит // *Физика твердого тела.* – 2009. – том 51, вып. 8.

Другие статьи и материалы конференций:

6. *Metamaterials Handbook*, edited by Filippo Capolino, Part 3, I. Vendik, O.G. Vendik, and M. Odit, «Isotropic double-negative materials», pp. 21-1 – 21-32 (Справочник по метаматериалам, часть 3, Изотропные материалы с отрицательный коэффициентом рефракции) // CRC Press. – 2009. – 1736 pages.
7. Одит М. А. Метаматериал на решетке связанных диэлектрических резонаторов [Текст] / М. А. Одит, И. Б. Вендик, О. Г. Вендик. // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ.* – 2008. – С. 3-11.
8. Vendik I. Isotropic Artificial Media with Simultaneously Negative Permittivity and Permeability (Изотропная искусственная среда с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями) [Текст] / I. Vendik, O. Vendik, M. Gashinova, I. Kolmakov, M. Odit // *Proceedings 3rd Workshop on Metamaterials, Italy, Rome.* – 2006.
9. Odit M. A. 3D Isotropic metamaterial based on dielectric resonant spheres (Трехмерный изотропный метаматериал на диэлектрических сферических резонаторах) [Текст] / M. Odit, I. Vendik, and O. Vendik // *Proceedings of 1st Metamaterial Congress, Italy, Rome.* – 2007. – P. 946-949.
10. Vendik I. B. 3D isotropic DNG material based on a set of coupled dielectric spheres with Mie resonance (Трехмерный изотропный метаматериал, основанный на взаимодействующих диэлектрических сферических частицах в условиях Ми-резонанса) [Текст] / I.B. Vendik and M.A. Odit // *Proceedings of 2 International*

Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Spain, Pamplona. – 2008. – P. 18-20.

11. Odit M. Modeling isotropic artificial media with simultaneously negative permittivity and permeability (Моделирование изотропной искусственной среды с одновременно отрицательными коэффициентами диэлектрической и магнитной проницаемостей) [Текст] / M. Odit, I. Kolmakov, O. Vendik, I. Vendik // Proc. of Days on Diffraction 2006. – 2006. – P. 81.

12. Odit M. 3D isotropic metamaterial based on dielectric resonant spheres (Трёхмерный изотропный метаматериал на диэлектрических сферических резонаторах) [Текст] / M. Odit, I. Vendik, O. Vendik // Proc. Of Days on Diffraction 2007. – 2007. – P. 67.

13. Vendik I. V. Isotropic double negative media based on resonance dielectric spheres (Изотропный метаматериал с отрицательными коэффициентами диэлектрической и магнитной проницаемостей на диэлектрических сферических резонаторах) [Текст] / I. V. Vendik, O. G. Vendik, M. A. Odit, I.A. Kolmakov // Proc. of 13th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena. – 2006. Finland, Rovaniemi, HUT. – P.10-13.

14. Одит М. А. Моделирование изотропного материала с отрицательными коэффициентами диэлектрической и магнитной проницаемости [Текст] / Одит М. А., Вендик И. Б., Вендик О. Г // Научно-технический семинар «Современные проблемы техники и электроники СВЧ», сборник докладов. – 2006. – С. 11.

15. Odit M. Dielectric spheres as constituents of isotropic metamaterial (Диэлектрические сферические частицы в качестве составляющих элементов изотропного метаматериала) [Текст]. // Proc. of 14th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena. – 2007. UK, Northern Ireland, Belfast. – P. 35-37.

16. Odit M. Negative refraction of a set of strongly coupled dielectric resonators (Отрицательное преломление структуры из сильно связанных диэлектрических резонаторов) [Текст] / M. A. Odit, I. V. Vendik // Proc. of 15th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena. – 2008. – St. Petersburg, ETU. – P.13-15.

17. Одит М. А. Применение метаматериалов в технологии маскировки. [Текст] / М. Одит, И. Вендик // сборник докладов научно-технического семинара «Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике». - 2008. – С. 10-11.

18. И. Б. Вендик. Изотропный метаматериал на основе сегнетокерамических сферических включений [Текст] / И. Б. Вендик, О. Г. Вендик, М. А. Одит // XVIII всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков - материалы конференции. 9-14 июня 2008. – СПб. – С. 157-158.

19. М. А. Одит. Изотропный метаматериал на диэлектрических кубических резонаторах [Текст] / М. А. Одит, И. Б. Вендик // Сборник докладов научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ» СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». – 2009. – С. 6-7.

20. М. А. Одит. Теоретические и физические ограничения для диэлектрических бисферических метаматериальных структур [Текст] / материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – с. 53.