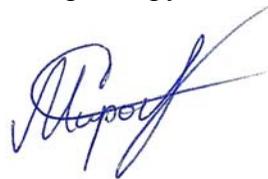


На правах рукописи



Мироньчев Александр Сергеевич

**МЕТАМАТЕРИАЛ ИЗ КОЛЬЦЕВЫХ
ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ РАДИОДИАПАЗОНА**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Якубов Владимир Петрович**

Официальные оппоненты:

Гошин Геннадий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, профессор

Кашкин Валентин Борисович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра радиотехники, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится 16 мая 2018 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (Главный корпус ТГУ, аудитория 119).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:

<http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/MironchevAS16052018.html>

Автореферат разослан « ____ » апреля 2018 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Пойзнер
Борис Николаевич

Актуальность избранной темы и степень ее разработанности

Почти полвека назад советский физик Виктор Георгиевич Веселаго выдвинул гипотезу о существовании материалов с отрицательным показателем преломления. Такие материалы имеют свойства, которых нет у известных материалов и не обнаружены у природных сред. Существует множество теорий о необычных свойствах метаматериалов: утверждается, что пластина, выполненная из материала с показателем преломления $n=-1$ является идеальной неотражающей пластиной. Позднее было показано, что кроме этого такая пластина может обладать фокусирующими свойствами, и выступать в роли линзы, однако за несколько лет интенсивных поисков Веселаго не нашел ни одного материала с подходящими электромагнитными свойствами, и его гипотеза была забыта.

Однако в середине 1990-х гг. ученые из Центра технологии материалов им. Маркони в Англии занялись созданием материалов, которые состоят из макроскопических элементов и рассеивают электромагнитные волны совсем не так, как любые известные вещества. В последние десятилетия возник лавинообразный интерес к данной тематике, поскольку такие материалы можно применять для: миниатюризации антенных систем, создания неотражающих покрытий, разработки «суперлинз».

В настоящее время, метаматериалы привлекают большой интерес научного мира своими уникальными свойствами, недостижимыми с использованием привычных материалов. В антенной технике, метаматериалы с их неординарными свойствами обеспечивают дополнительные возможности: меньшие размеры, высокий коэффициент усиления антенны и более широкую полосу пропускания.

В последнее десятилетие XX века во многих странах проводились интенсивные исследования по широкому кругу вопросов, относящихся к физике сложных электромагнитных сред и искусственных материалов, которые предназначаются для применения в современных радиотехнических и оптических устройствах. Были достигнуты впечатляющие результаты в области теории, позволившие лучше понять радиофизические принципы создания новых электромагнитных материалов, а также выявить потенциальные возможности и диапазон достижимых значений материальных параметров. Поэтому не случайно, что на грани тысячелетий появился специальный термин «метаматериал». Его предложил в 2000 году Роджер Уолсер. Введением этого нового понятия, которое постепенно было принято научным сообществом и прочно закрепилось в литературе, была фактически обозначена потребность в создании нового поколения искусственных композитных материалов, в которых были бы реализованы ранее не достигнутые и пока не обнаруженные в природе, но востребованные на практике и принципиально возможные значения диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и других электромагнитных параметров. В том же году появилось первое сообщение о создании экзотической композитной среды с отрицательными значениями как

диэлектрической, так и магнитной проницаемости (исследовательская группа Давида Смита из университета Дьюка в Дареме, штат Северная Каролина (США)).

Согласно Википедия (свободная энциклопедия), метаматериал — это композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой. Они представляют собой искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными или акустическими свойствами, сложнодостижимыми технологически, либо не встречающимися в природе. Под такими свойствами следует понимать особые значения физических параметров среды, например, отрицательные по величине значения как диэлектрической ϵ , так и магнитной μ проницаемостей, пространственную структуризацию (локализацию) распределения величин этих параметров (в частности, периодическое изменение коэффициента преломления как у фотонных кристаллов), наличие возможности управления параметрами среды в результате внешних воздействий (метаматериалы с электрически управляемой диэлектрической и магнитной проницаемостями) и т.д. Такое широкое понимание метаматериалов существенно расширяет спектр их применений.

Все вышесказанное обуславливает актуальность диссертационной работы, целью которой является проведение исследования о возможности создания широкополосных метаматериалов для радиодиапазона. В основе исследования лежит электродинамический анализ структуры токов, наводимых под действием падающей плоской волны на простейших проводниках разомкнутого и замкнутого типов. В предположении отсутствия существенного взаимодействия проводников между собой рассматривается возможность появления отрицательных значений поляризуемости и намагничиваемости. Приводятся результаты численного моделирования метаматериалов и измерения их свойств в гигагерцовом диапазоне частот.

Цель работы

Теоретическое и экспериментальное исследование возможности создания широкополосного метаматериала для радиодиапазона, а также анализ возможностей его практического использования.

Основные задачи

1. Исследование состояния проблемы создания метаматериала, пригодного для электромагнитного излучения радиодиапазона с использованием композиции замкнутых проводников.
2. Анализ электродинамических основ построения метаматериала как гетерогенной среды, т.е. неоднородной (композиционной) системы, состоящей из однородных частей (фаз), разделённых поверхностью раздела.

3. Построение метода расчета взаимодействия электромагнитной волны со средой метаматериала с учетом эффектов поглощения и многократных взаимодействий. Верификация метода.
4. Использование разработанного метода для анализа возможности создания отрицательного лучепреломления и получения эффекта суперлинзы на основе плоского слоя метаматериала.
5. Проведение численного эксперимента по созданию слоя метаматериала из кольцевых проводников.
6. Изготовление экспериментального макета метаматериала и проведение его исследования с использованием сверхширокополосного радиоизлучения.
7. Разработка рекомендаций о возможности практического создания и использования метаматериалов в радиодиапазоне.

Методы исследования

Работа основана на использовании математических методов расчета электромагнитных полей систем из разомкнутых и замкнутых проводников электрических и магнитных токов. Для описания взаимодействия плоских волн со слоем метаматериала применялись известные методы электродинамического анализа. Анализ взаимодействия элементов решетки из замкнутых проводников проводился с использованием численного моделирования в среде CST Microwave Studio и дальнейшей обработкой в среде MathCad. Экспериментальная часть работы основана на использовании СШП антенн, анализатора цепей PNA-L NetworkAnalyzer компании Agilent Technologies. Обработка данных производилась с помощью написанного автором специального программного обеспечения.

Защищаемые положения:

1. При описании процессов распространения электромагнитных волн в плоскостойких метаматериалах с произвольным комплексным показателем преломления, при которых возникают эффекты отрицательного преломления и сверхфокусировки, для соблюдения граничных условий и сохранения баланса энергии при переходе через границу необходимо и достаточно исключить асимптотически незатухающие однородные и неоднородные составляющие при использовании спектрального разложения по плоским волнам всего многократно переотраженного поля.
2. Одновременное существование отрицательных нерезонансных намагничиваемости и поляризуемости у электрически малых идеально проводящих кольцевых проводников приводит к возникновению широкополосного (согласно терминологии, введённой DARPA) отрицательного показателя преломления у метаматериала, синтезируемого из этих проводников. При взаимодействии множества электрически близко расположенных таких проводников наблюдается отрицательная вещественная часть комплексного показателя преломления в широкой полосе частот.

3. Матричная структура составленная из периодически расположенных стальных кольцевых проводников (шайб) с внешним и внутренним диаметрами 8 мм и 4 мм, расположенных во вспененном полистироле на расстоянии 10 мм между центрами колец в трех ортогональных направлениях и ориентированных параллельно вектору напряженности электрического поля падающей волны, обеспечивает эффект отрицательного фазового набега в полосе частот 9,9–10,9 ГГц с комплексным коэффициентом преломления $n = -3,84 + i 1,8$ при разбросе значений не более 10 % в случае использования 2-х слоев. Удвоение же поперечной концентрации кольцевых проводников и сведение структуры до одного слоя обеспечивает коэффициент преломления порядка $n = 0,46 + i 0,09$ в сверхширокой полосе частот 6 – 20 ГГц.

Достоверность защищаемых положений и других результатов

Оценка достоверности первого защищаемого положения предполагает проверку корректности полученного на основе этого положения метода расчета электромагнитных полей в плоскостойких метаматериалах с произвольным комплексным показателем преломления. Предложенный метод основан на комбинации известных способов описания электромагнитных полей. Метод был проверен на ряде диэлектрических сред. Для этого производился расчет электромагнитного поля при прохождении плоской волны через плоский слой с комплексным показателем преломления $n = 2 + 0.1i$. Полученный результат сравнивался с результатом расчета, полученного с использованием соотношений Бреховских Л.М. для электромагнитных волн в плоскостойких диэлектрических средах. В результате проверки получено полное совпадение составляющих электромагнитного поля. Достоверность результатов, полученных для метаматериальных сред, проверена с использованием закона сохранения энергии. Суть проверки заключается в сохранении баланса энергии при переходе через границу раздела. Показано, что учет всевозможных многократных переотражений в плоскостойких средах с использованием разработанного метода является адекватным при всех углах падения согласно теореме Пойнтинга. Применимость метода для описания отрицательного преломления и сверхфокусировки подтверждена в двух случаях: коллимированного пучка и сферической волны.

Достоверность второго защищаемого положения обеспечивается тем, что его формулировка базируется на результатах решения интегрального уравнения Поклингтона, математически строго установленного, исходя из уравнений Максвелла, граничных условий и материальных уравнений. Полученные расчетные результаты не противоречат известным выводам о поляризуемости электрически малого прямолинейного вибратора, опубликованным не только в

научной, но и в учебной литературе¹. Это обстоятельство служит дополнительным обоснованием применимости интегрального уравнения Поклингтона при исследовании проблемы намагничиваемости и поляризуемости электрически малых кольцевых проводников. Учет взаимодействия полей ближней зоны кольцевых проводников определяется использованием широко известного коммерческого пакета CST Microwave studio. Правильность использования пакета CST Microwave studio предварительно проверяется на ряде известных структур: одиночные вибраторы, кольца и др. Такая проверка служит еще одним доказательством справедливости проведенных ранее электродинамических расчетов решения уравнения Поклингтона для одиночных объектов в виде вибраторов и кольцевых проводников. Аналитические и численные результаты дают одинаковые физические выводы.

Достоверность третьего защищаемого положения обеспечивается разработанной максимально простой схемой измерений показателя преломления создаваемой плоскостойкой среды, установленной между передающей и приемной СШП антеннами, подключёнными к высокоточному векторному анализатору цепей фирмы Agilent. Корректность выбранной методики измерений проверяется сначала на стандартных диэлектрических структурах типа органическое стекло и шифер. Наблюдается совпадение результатов с известными параметрами для этих тестовых сред с той точностью, с которой они известны и приводятся в справочной литературе², т.е. 0,05%. Важно, что по выбранной методике измерений найденные значения показателя преломления тестовых сред сохраняются во всем выбранном частотном диапазоне от 2 ГГц до 16 ГГц. Использование выбранной методики для синтезированных метаматериалов становится оправданным, а найденные таким образом значения показателя преломления определяются однозначно, разумеется, с контролируемой точностью.

Научная новизна

1. Новизна первого защищаемого положения состоит в том, что предложено исключать незатухающие составляющие электромагнитного поля при спектральном разложении по плоским волнам. В свою очередь это породило метод расчета поля при прохождении волн через плоский слой или систему слоев метаматериала с произвольным комплексным показателем преломления. В рамках метода предложено выполнить оценку влияния многократных переотражений на фокусировку

¹ Фрадин Ф.З. Антенно-фидерные устройства. Учебное пособие. М.: «Связь», 1977. 440 с.; Митра, Р. Вычислительные методы в электродинамике / Р. Митра; пер. с англ. под ред. Э.Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1977. 485 с.

² Бензарь В.К. Техника СВЧ-влагометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1974. – 352 с.

плоскопараллельной пластиной из метаматериала с любым комплексным показателем преломления.

2. Новизна второго защищаемого положения состоит в том, что обнаружена сама возможность существования широкополосных свойств у метаматериалов, составленных из электрически малых замкнутых проводников. При этом показана существенная роль полей ближней зоны в формировании широкополосных свойств конструируемого метаматериала.
3. Научная новизна третьего защищаемого положения состоит в том, что разработан и практически осуществлен макет матричной структуры из замкнутых кольцевых проводников, имеющий отрицательный показатель преломления. Обнаружена широкополосность таких композиционных метаматериалов.

Научная ценность

1. На основе первого защищаемого положения разработан не имеющий аналогов метод расчета поля при прохождении волны через плоский слой или систему слоев метаматериала с произвольным комплексным показателем преломления, как с учетом, так и без учета многократных переотражений. Этот метод, в частности, позволяет рассчитать эффект фокусировки плоским слоем из метаматериала с комплексным показателем преломления и возможность превышения дифракционного предела.
2. Второе защищаемое положение закладывает электродинамические основы построения широкополосных метаматериалов радиодиапазона, потому что устанавливает особую роль замкнутых проводников для получения отрицательных и нерезонансных намагничиваемости и поляризуемости конструируемой среды.

Практическая значимость

1. Предложенная в третьем защищаемом положении методика изготовления метаматериала с отрицательным значением вещественной части комплексного показателя преломления в полосе частот от 8,5 до 10,9 ГГц, что актуально при создании широкополосных «суперлинз» (превосходящих дифракционный предел) для радиоволновой томографии, разработке новых антенных систем и маскирующих покрытий.
2. В численном эксперименте показано, что эффективная площадь рассеяния (ЭПР) шара, покрытого метаматериалом, созданного по третьему защищаемому положению (с показателем преломления $n = 0.5 + 0.1i$), составляет 42 – 60% по отношению к ЭПР шара без покрытия. в диапазоне частот 5 – 11 ГГц, что демонстрирует перспективу применения разработанного метаматериала для сокрытия целей.

Внедрение результатов диссертации и рекомендации по дальнейшему использованию

Все результаты диссертации использованы при реализации проектов и включены в отчеты по НИР:

1. «Физико-математическая модель радиолокационного томографа», АВЦП, номер госрегистрации темы (РК): 01200901345, (2009-2011), рук. Якубов В.П.;

2. «Исследование волновых процессов в неоднородных средах и создание основ радиовидения высокого разрешения с использованием метода синтеза апертуры», ФЦП 1006600, номер госрегистрации темы (РК): 01201061836, (2010-2012), рук. Якубов В.П.;

3. «Разработка физических и математических основ радиоволновой подповерхностной томографии для комплексного анализа земных покровов в геофизике», Грант, номер госрегистрации темы (РК): 01201365422, (2013-2015), рук. Якубов В.П.;

4. «Радиоволновой томосинтез неоднородных сред и объектов», Госзадание Минобрнауки России, номер госрегистрации темы (РК): 01201257789, (2012-2014), рук. Якубов В.П.;

5. «Фундаментальные ограничения в ближнеполевой электродинамике сложных излучающих систем», Грант, номер госрегистрации темы (РК): 01201365421, (2013-2015), рук. Беличенко В.П.

6. «Разработка новых методов, систем и технологий волновой томографии скрытых предметов для обеспечения безопасности», Государственный контракт ВИУ, номер госрегистрации темы (РК): 114111740182, (2014), рук. Якубов В.П.;

7. «Разработка радиофизических, оптических и ультразвуковых методов, аппаратуры и программных средств для комплексных исследований окружающей среды», Государственный контракт ВИУ, номер госрегистрации темы (РК): 114111740173, (2014), рук. Дёмин В.В.;

8. «Разработка радиофизических, оптических и ультразвуковых методов, аппаратуры и программных средств для комплексных исследований окружающей среды», Государственный контракт ВИУ, номер госрегистрации темы (РК): АААА-А16-116040750154-4, (2015-2016), рук. Дёмин В.В.;

9. «Разработка научно обоснованных предложений по корректировке образовательной политики университетов Сибири на основе прогнозирования изменений региональной экономики, изучения потребностей рынка труда, требований работодателей и лучших образовательных практик», Государственный контракт ВИУ, номер госрегистрации темы (РК): АААА-А15-115122210015-9, (2015), Демкин В.П.;

10. «Волновые методы обеспечения безопасности», Государственный контракт ВИУ, номер госрегистрации темы (РК): АААА-А15-115122110024-2, (2015-2016), рук. Якубов В.П.;

11. «Исследование возможностей применения джиттера для увеличения разрешающей способности в подповерхностной радиотомографии», Грант, номер госрегистрации темы (РК): АААА-А16-116021010351-5, (2016-2017), рук. Клоков А.В.;

12. «Исследование закономерностей фазовых переходов активных и реактивных электромагнитных полей в зоне их формирования излучающими и приемными системами и разработка на этой основе новых методов зондирования неоднородных сред и объектов», Грант, номер госрегистрации темы (РК): АААА-А16-116060950098-7, (2016-2018), рук. Якубов В.П.;

13. «Ближнеполюсная диагностика материалов, объектов и сред в перекрывающихся эванесцентных полях систем излучателей», Грант, Номер госрегистрации темы (РК): А-А16-116040750169-8, (2016-2018), рук. Беличенко В.П.;

14. «Разработка опытного образца суперлинзы для радиоволновой томографии», Инновационный проект по молодежной программе «УМНИК», (2013-2014), рук. Мироньчев А.С.

Результаты моделирования решеток из кольцевых проводников, а также результаты экспериментального исследования использованы в магистерской диссертационной работе А.В. Горста, защищенной в 2017 г. Кроме того, методика измерений комплексного показателя преломления использована в бакалаврской работе Ф.А. Баркова защищенной в 2017 г. Результаты работы использованы в учебном процессе по исследованию взаимодействия радиоволн с веществом на РФФ НИ ТГУ³.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы, основные положения работы и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на 12 международных, 8 всероссийских и 3 региональных конференциях: Актуальные проблемы радиофизики: Международная молодежная научная школа. Томск, 25–26 сентября 2017 г; Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" (Челябинск, 2016 г.); 26-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016 г.); VII Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2016 г.); XXV Всероссийская открытая конференция «РАСПРОСТРАНЕНИЕ

³ Якубов В.П., Беличенко В.П., Фисанов В.В. Основы электродинамики излучения и его взаимодействие с веществом: учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 296 с.

РАДИОВОЛН» (Томск, 2016 г.); Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов (Томск, 2016 г.); XII Международная научно-практическая конференция "Электронные средства и системы управления" (Томск, 2016 г.); 6-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2015 г.); Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов (Томск, 2015 г.); XI Сибирское совещания по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2015 г.); VI Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2015 г.); X Международная научно-практическая конференция "Электронные средства и системы управления" (Томск, 2014 г.); Международная молодежная научная школа «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2014 г.); 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2014 г.); III Научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ИСС» 2014 (Железногорск, 2014 г.); V Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2014 г.); Первая всероссийская конференция Студенческого научно-исследовательского инкубатора (Томск, 2014 г.); Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы радиофизики" (Томск, 2013 г.); IV Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2013 г.); Конференция Студенческого научно-исследовательского инкубатора (Томск, 2013 г.); Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы радиофизики" (Томск, 2012 г.); III Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии». (Томск, 2012 г.); Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы радиофизики" (Томск, 2010 г.).

Личный вклад автора

Совместно с научным руководителем работы доктором физико-математических наук, профессором, В.П. Якубовым был определён план диссертационной работы, обсуждались и анализировались результаты исследований. Диссертационная работа планировалась и реально выполнялась как часть комплексных исследований по вопросам созданию широкополосных метаматериалов и их взаимодействия с радиоволнами, которые проводились кафедрой радиофизики ТГУ. Автор диссертации осуществлял руководство и принимал непосредственное участие во всех представленных в работе экспериментах. Автором разработано программное обеспечение для обработки экспериментальных данных.

Благодарности

Выражаю свою искреннюю благодарность профессорско-преподавательскому составу кафедры радиофизики, в том числе кандидату физико-математических наук Е. В. Балзовскому за помощь в проведении

численных моделирований с использованием программного пакета CST Microwave studio, кандидату физико-математических наук А. В. Клокову за практическую помощь в организации экспериментальных работ. Помощь в обработке экспериментальных данных оказали доценты кафедры радиофизики А.С. Запасной, С.Э. Шипилов и кандидат физико-математических наук Р.Н. Сатаров. Большую помощь в проведении экспериментальных и теоретических исследований оказал магистрант А.В. Горст.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 31 работа [1 – 31]: 9 статей в журналах из перечня ВАК [1 – 9]; 20 в сборниках научных трудов и материалах конференций; 8 работ, индексируемых цитата-аналитической базой (ЦАБ) Web of Science [1,2,10 – 15]; 9 работ, индексируемых ЦАБ Scopus [1,2,10 – 16].

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В работе содержится 151 листов машинописного текста, 133 рисунка, 2 таблицы. Список литературы включает 116 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования, приведены защищаемые положения, показана научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, личный вклад, кратко изложено содержание работы.

В первой главе дан обзор литературы по теме диссертации. Приводятся различные структуры со свойствами метаматериалов, методы конструирования таких сред и их возможное практическое применение. Сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе анализируется возможность появления отрицательного показателя преломления и предлагается метод описания распространения волн в плоскостойких метаматериалах. Для изотропной среды n вводится соотношением $n = k/k_0$, где $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = \omega/c$ – волновое число для свободного пространства (вакуума). Поскольку $k = \omega\sqrt{\varepsilon_a\mu_a}$, то отсюда следует, что $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$.

На рисунке 1 показаны значения n^2 и $n = \sqrt{n^2} \equiv n' + i n''$, вычисляемые в соответствие с правилами теории функций комплексного переменного для метаматериала, у которого $\varepsilon' < 0$ и $\mu' < 0$. Величина $n = \sqrt{n^2} \equiv n' + i n''$ имеет два значения, показанные цифрами 1 и 2. Мнимая часть этих величин n'' имеет разные знаки. Отрицательный знак для n'' (точка 2), не является физически оправданным, т.к. в этом случае энергия нарастает с углублением в среду. Физически оправданным является только корень при $n'' \geq 0$ (точка 1).

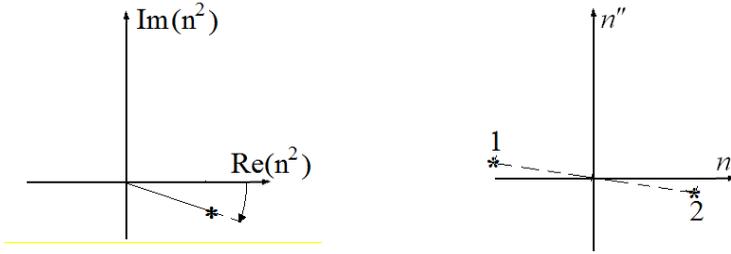


Рисунок 1 – Комплексные значения n^2 и $n = \sqrt{n^2} \equiv n' + i n''$

Таким образом, при $\varepsilon' < 0$ и $\mu' < 0$ физически оправданным будет только одно значение коэффициента преломления $n = \sqrt{n^2} \equiv n' + i n''$, для которого $n'' \geq 0$, а $n' \leq 0$. Это соответствует метаматериалу. Переходя к пределу $\varepsilon'' \rightarrow 0$ и $\mu'' \rightarrow 0$, получим, что $n'' \rightarrow 0$ и $n \leq 0$. Среду с $n'' = 0$ будем называть вещественным метаматериалом.

Для описания распространения волн в плоскостойких метаматериалах применимо разложение Вейля, основанное на разложении исходной сферической волны в спектр по плоским волнам:

$$G(r) = \frac{\exp\{ikr\}}{4\pi r} = \frac{i}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{i\kappa_x x + i\kappa_y y + i\kappa_z z\}}{2\kappa_z} d\kappa_x d\kappa_y,$$

где $\kappa_z = \sqrt{k^2 - \kappa_x^2 - \kappa_y^2}$. При этом в разложении участвуют как однородные, так и неоднородные волны. Здесь и далее корень квадратный вычисляется так, чтобы $\text{Im } \kappa_z \geq 0$. Это есть обобщение известного принципа предельного поглощения в электродинамике.

Прохождение каждой из плоских волн через границу раздела сред описывается с использованием коэффициентов прохождения и отражения Френеля. Разложение Вейля представляет собой двумерное обратное преобразование Фурье. Учитывая сказанное, для поля волны в преломляющей среде можно записать:

$$E(r) = \hat{F}^{-1} \left[\exp\{i z \kappa_z\} \hat{F} [E(r_s)] \right].$$

Здесь операторы $\hat{F} [E]$ и $\hat{F}^{-1} [E]$ означают прямое и обратное преобразования Фурье. Поле $E(r_s)$ представляет собой распределение комплексной амплитуды волны, падающей на метаматериал, а величина n означает показатель преломления этого материала. Значение глубины погружения точки наблюдения в метаматериал задается величиной z .

Пример расчета распределения интенсивности поля преломленной метаматериалом волны представлен на рисунке 2. Для сравнения здесь же

показано распределение интенсивности прошедшего поля в случае обычного диэлектрика. Для наглядности был рассмотрен случай коллимированного пучка.

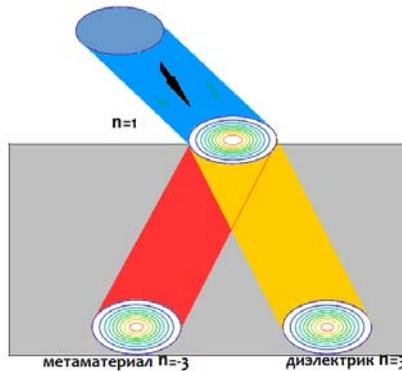


Рисунок 2 – Моделирование эффекта преломления волны для обычного диэлектрика и для метаматериала

Далее в главе рассматривается взаимодействия электромагнитных волн со слоем метаматериала. Поскольку метаматериал обладает потерями, он способен отражать и рассеивать часть энергии, то при расчете поля проходящего через слой, необходимо учитывать многократные переотражения волн границами слоя.

Распределение амплитуды поля при прохождении слоя диэлектрика и метаматериала идентичны. Перед слоем интерферируют падающая и отраженная волны. В самом слое наблюдается суперпозиция прошедшей волны и многократно отраженной от второй границы раздела сред. За слоем наблюдается только прошедшая волна, амплитуда имеет линейный характер, а ее уровень определяется коэффициентом прохождения.

На рисунке 3 показаны результаты расчетов фазовых набегов Φ , образующихся суммарных волн для случая обычного диэлектрика (а) и метаматериала (б) при двух различных углах падения $\alpha = 30^\circ$ (1) и $\alpha = 47^\circ$ (2). Частота излучения была задана $f = 10$ ГГц, а толщина слоя – $d = 5$ см. Комплексные проницаемости для метаматериала были заданы: $\epsilon = -4 + 0,001i$, $\mu = -2 + 0,001i$. Для обычного магнитодиэлектрика их значения были заданы, соответственно равными: $\epsilon = 4 + 0,001i$, $\mu = 2 + 0,001i$.

Видно, что влияние метаматериала сводится к появлению отрицательного набега фазы у волны, прошедшей слой. Внутри слоя образуются неоднородные т.н. «левые» волны с отрицательным набегом фазы.

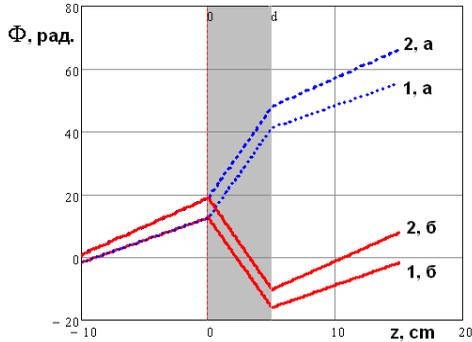


Рисунок 3 – Фазовый набег волны в слое обычного диэлектрика (а) и метаматериала (б)

Однако при произвольном угле падения влияние многократных переотражений на фазовую структуру суммарного поля незначительно. Фазовая картина отражает наличие стоячих волн. Внутри слоя длина волны уменьшается и как следствие уменьшается пространственный период следовая стоячих волн.

Проведен анализ влияния многократных переотражений волн внутри слоя на мощность излучения, т.е. на комплексный вектор Пойнтинга. Были исследованы зависимости коэффициентов отражения V , прохождения T и поглощения W по мощности для плоского слоя метаматериала от угла падения плоской волны в случае горизонтальной и вертикальной поляризации без учета и с учетом многократных переотражений. Выбранный слой метаматериала, толщиной $d = 5$ см с параметрами: $\varepsilon = -4 + 0.001i$, $\mu = -2 + 0.001i$.

Проведенные исследования показали, что при некотором угле падения волны ($\alpha = 58^\circ$) наблюдается просветление слоя, соответствующий четвертьволновому наклонному пути волны в слое. Этот угол существует и для горизонтальной и для вертикальной поляризации падающей волны. Для вертикальной поляризации наблюдается эффект угла Брюстера ($\alpha = 47^\circ$), при котором отражение минимально, а действие угла Брюстера пролонгируется.

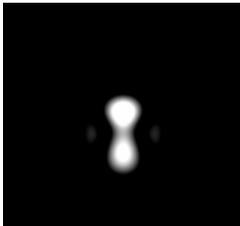
Все проведенные расчеты с учетом многократных переотражений тщательно протестированы на совпадение граничных условий, непрерывности фазы и теоремы Пойнтинга при переходе границ раздела сред, для однородных и неоднородных волн.

Следствием необычного преломления на поверхности, разделяющей обычный диэлектрик и метаматериал, является эффект собирающей линзы, который наблюдается для плоскопараллельной пластины, выполненной из среды с отрицательным показателем преломления и помещенной в среду с положительным показателем преломления.

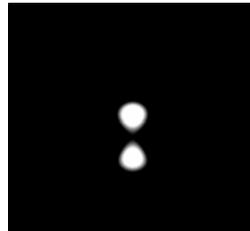
Плоскопараллельная неотражающая пластина является совершенной линзой («суперлинзой») способной преодолеть дифракционный предел. При рассмотрении фокусировки плоскопараллельной пластиной из метаматериала,

возможно получать изображение, не только за слоем на некотором расстоянии, но и на второй границе раздела.

Для проверки утверждения, что плоскопараллельная пластина, изготовленная из метаматериала, является «суперлинзой». На рисунке 4 представлен результат моделирования фокусировки собирающей линзой и плоскопараллельной пластиной из метаматериала. Расстояние между источниками 10 см, длина волны излучения равна 10 см, расстояние между плоскостью источников и метаматериалом равно 20 см, аналогично и для линзы. Фокусировка происходит на границе слоя метаматериала с показателем преломления $n = -2 + 0.01i$, толщина слоя равна 56 см.



Диэлектрическая линза



Метаматериал

Рисунок 4 – Сравнение фокусировки собирающей линзой и метаматериалом

Изображение, полученное с помощью метаматериала лучше изображения полученного линзой. Эти данные являются подтверждением того, что с помощью пластины из метаматериала возможно превзойти дифракционный предел. Все сказанное доказывает эффективность разработанного метода расчета полей в слое метаматериала.

В третьей главе делается шаг в конструировании метаматериала и приводится электродинамический анализ искусственных сред, составленных из разомкнутых и замкнутых металлических проводников, ориентированных определенным образом.

Для среды из кольцевых проводников введен коэффициент намагничиваемости $\eta = \eta(2ka, r_0/a)$, который является величиной комплексной и зависит от двух параметров проводника: электрического диаметра кольца $2ka$ и относительного радиуса сечения провода r_0/a . Результаты численного расчета показывают (рисунок 5), что при всех электрических диаметрах кольцевого проводника (рабочих частотах) величина $\eta = \eta' + i\eta''$, а значит и $\mu = \mu' + i\mu''$ имеют отрицательные вещественные части: $\eta', \mu' < 0$.

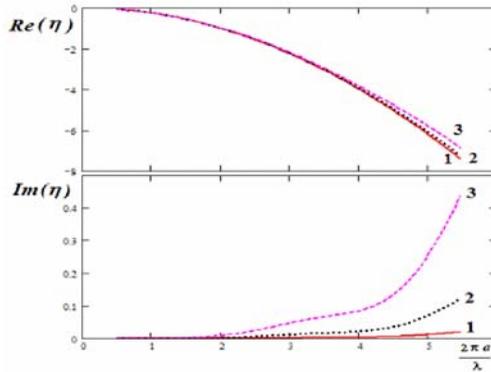


Рисунок 5 – Комплексный коэффициент намагничиваемости кольцевого проводника в зависимости от его электрического диаметра $2ka$ и относительного сечения: 1 – $r_0/a = 0,01$; 2 – $r_0/a = 0,025$; 3 – $r_0/a = 0,05$

Чем больше диаметр кольца и чем меньше сечение, тем более отрицательными они становятся. При этом их мнимые части всегда остаются положительными, но малыми η'' , $\mu'' > 0$ и слабо зависят от относительного радиуса сечения провода.

Рассмотренный замкнутый кольцевой проводник помимо намагничиваемости имеет также электрическую поляризуемость. Результаты расчета γ показаны на рисунке 6. Если из кольцевых проводников составить композитную среду, то при достаточно большом количестве кольцевых проводников в объеме проникновения электромагнитной волны соответствующая эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1 + Nv_0\gamma$ может также попасть во второй квадрант комплексной плоскости. Для этого достаточно чтобы выполнялось неравенство: $Nv_0 \operatorname{Re}(\gamma) < -1$.

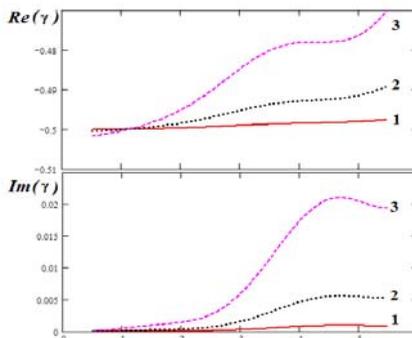


Рисунок 6 – Комплексный коэффициент поляризуемости кольцевого проводника в зависимости от его электрической длины $2\pi a/\lambda$ и относительного сечения: 1 – $r_0/a = 0,01$; 2 – $r_0/a = 0,025$; 3 – $r_0/a = 0,05$

В результате теоретического исследования, показано, что используя простейшие элементы (проводник конечной длины и кольцевой проводник) возможно, создать среду со свойствами метаматериала. Также показано, что используя только кольцевые проводники, возможно создать структуру обладающую свойствами метаматериала.

В данной главе также приводятся результаты численного моделирования различных структур с использованием программного обеспечения CST Microwave studio.

Существенное значение имеют результаты моделирования замкнутого проводника при падении на него плоской волны. При рассмотрении токов, наводимых на кольцо, удалось подтвердить возможность создания метаматериала с использованием только кольцевых проводников. Так как ранее не учитывалось взаимодействие проводников между собой, то был проведен ряд численных расчетов падения плоской волны на кольцевые проводники с различным расположением в пространстве (рисунок 7). Для удобства описания взаимодействия использован комплексный вектор Пойнтинга.

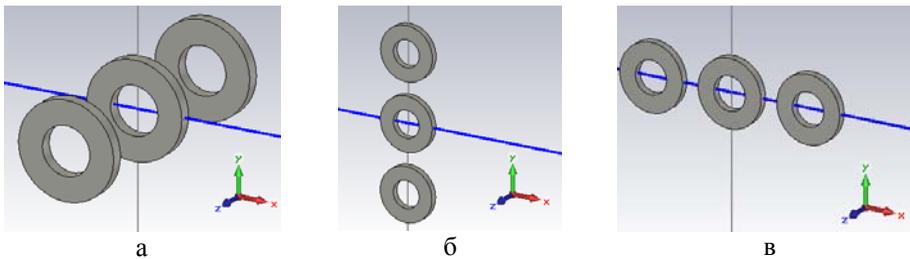


Рисунок 7 – Модели из замкнутых проводников

Максимальное значение активной составляющей вектора Пойнтинга за элементами удаётся достичь при расположении колец друг за другом (вдоль оси OX , рисунок 7в), минимальное наблюдается при расположении колец вдоль оси OZ (рисунок 7а). Что касается его реактивной составляющей, то перед элементами она максимальна в случае при расположении колец друг над другом (вдоль оси OY , рисунок 7б), и минимальна при расположении колец друг за другом (вдоль оси OX , рисунок 7в). За проводниками реактивная составляющая так же максимальна при расположении колец друг над другом (вдоль оси OY , рисунок 7б), и минимальна в случае расположения колец по бокам (вдоль оси OZ , рисунок 7а). Полученные результаты позволяют оценить взаимодействие кольцевых элементов друг с другом и помочь при моделировании структур имеющих свойства метаматериала.

Далее в этой главе рассмотрена матричная структура из таких элементов. Наиболее важные результаты были получены для структуры из четырёх слоев кольцевых элементов (с размерами: внешний диаметр 8 мм, внутренний диаметр 4 мм, толщина 1 мм) выполненных из идеального проводника, соосно расположенных и смещенных относительно друг друга (рисунок 8). Расстояние

между центрами проводников составляло 10 мм. Максимальное взаимодействие колец в такой структуре наблюдается на частоте 9 ГГц.

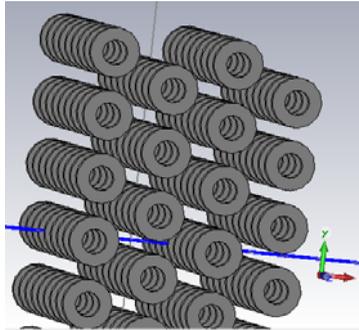


Рисунок 8 – Решетка из 4-х слоёв кольцевых проводников

Рассматривались фазовые характеристики по полному полю. Рассчитывались амплитуда и фаза для каждой компоненты поля вдоль линии проходящей через центр структуры. Все данные переносились в среду Mathcad, находилось распределение комплексного поля.

На графике фазовой характеристики (рисунок 9а) виден отрицательный фазовый набег. Получившаяся реальная часть эквивалентного показателя преломления для данной модели: $Re(n) = -0,036$. На рисунке 9б приведена зависимость амплитуды от расстояния, где 0 по оси абсцисс это центр решетки, маркерами отмечены края модели. Видно, что перед слоем наблюдается интерференционная картина, которая говорит о присутствии отражённой волны. За слоем наблюдается увеличение амплитуды сигнала, которая превышает амплитуду падающей волны. На рисунке 10 представлено распределение амплитуды поля E в различных плоскостях. За структурой наблюдается зона фокусировки, что не противоречит теории, поскольку материалы, обладающие отрицательным фазовым набегом способны фокусировать излучение.

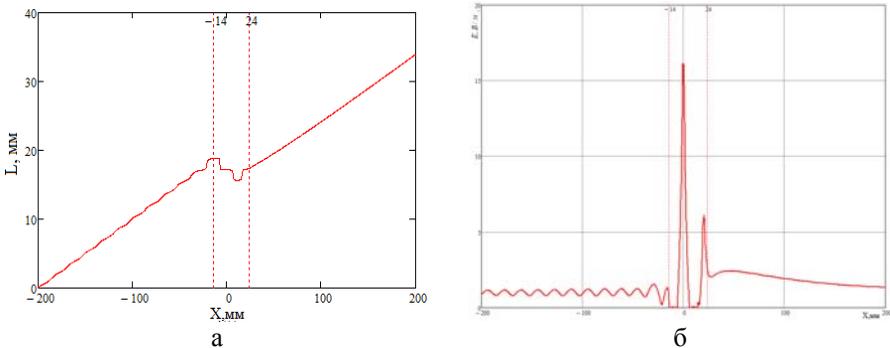


Рисунок 9 – Фазовая (а) и амплитудная (б) характеристики для решетки из четырёх слоёв на частоте 9 ГГц

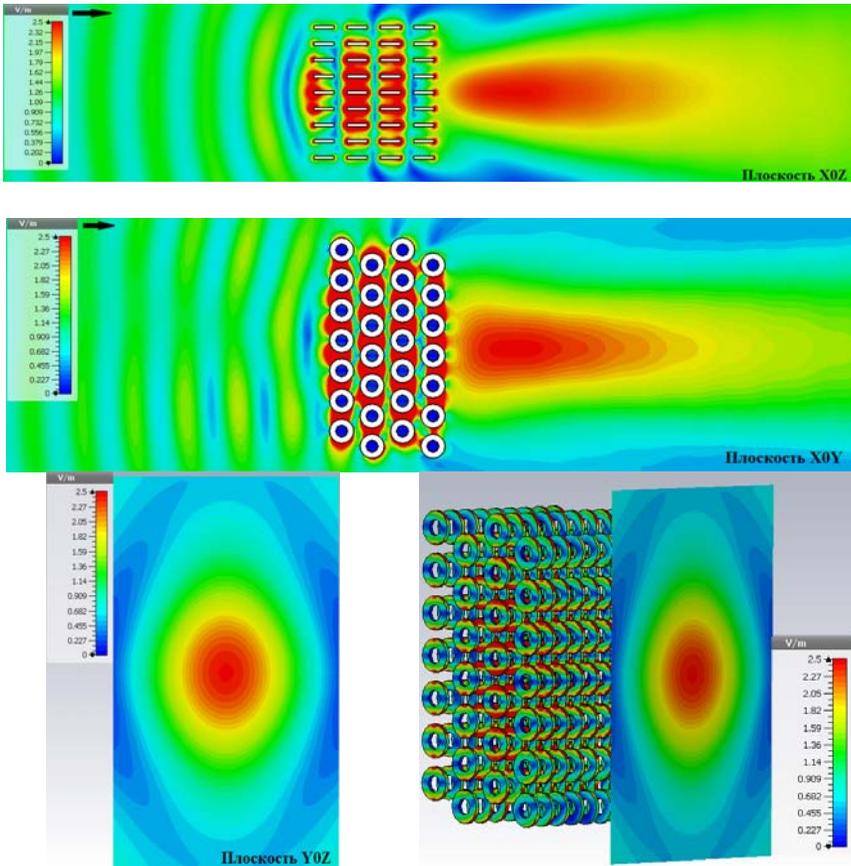


Рисунок 10 – Распределение амплитуды поля в различных плоскостях

Таким образом, используя исключительно кольцевые проводники, удаётся получить материал с отрицательным значением реальной части показателя преломления.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальная установка содержит следующие основные элементы: анализатор цепей PNA-L Network Analyzer (N5230C) компании Agilent Technologies (с полосой частот 10 МГц – 40 ГГц) и две приемо-передающие антенны. В качестве приемо-передающих антенн использовались комбинированные антенны типа «Улитка», разработанные на кафедре радиофизики НИ ТГУ Ю.И. Буяновым и Е.В. Балзовским. КСВН изготовленных антенн не превышал 1,5 в полосе частот 2,5 – 22 ГГц.

В ходе эксперимента измерялся комплексный коэффициент прохождения. В последующем проводилась дополнительная математическая

обработка, которая заключалась в частотно-временной фильтрации, применении регуляризации по Тихонову. Далее по углу наклона фазовой кривой определялась вещественная часть комплексного показателя преломления. Мнимая часть определялась по углу наклона амплитудной зависимости, которая строилась в полулогарифмическом масштабе. Для проверки метода измерения проводилась серия экспериментов, в которых использовались образцы с известным комплексным показателем преломления. Результаты совпали с табличными значениями в пределах погрешности.

Для первой серии экспериментальных исследований были изготовлены образцы метаматериала из пластин вспененного полистирола, в которые помещались стальные шайбы, соответствующие кольцам в компьютерной модели. В одну пластину пенопласта с шагом в 1 см было вставлено 900 шайб. Всего изготовлено четыре пластины, которые возможно соединять друг с другом.

На рисунке 11 приведены зависимости амплитуды и фазы коэффициента прохождения для двух слоев колец. Из рисунка видно, что на частотах от 9,95 до 10,9 ГГц имеет место уменьшение набега фазы. На приведенном частотном интервале комплексный показатель преломления составил: $n = -3,84 + 1,8i$. Эти результаты свидетельствуют о наличии свойств метаматериала у решетки, составленной из кольцевых проводников. В то же время мнимая часть показателя преломления свидетельствует о достаточно сильном затухании на этих частотах.

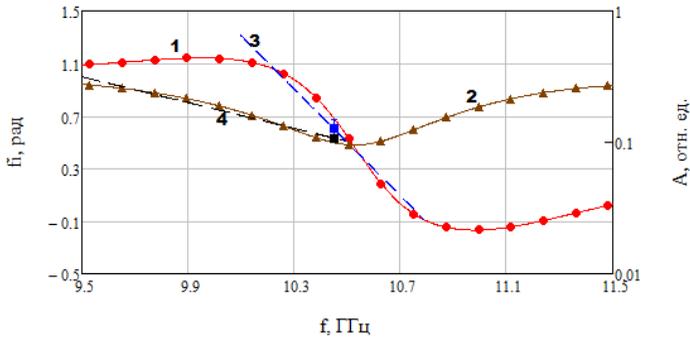


Рисунок 11 – Зависимость амплитуды (2) и фазы (1) прошедшего сигнала от частоты для двух слоев колец толщиной 2 см, линейная регрессия фазы (3) и амплитуды (4)

Минимальное значение вещественной части $Re(n) = -3,84 \pm 0,13$ достигается при количестве слоев равным двум. Дальнейшее увеличение количества слоев, не приводит к уменьшению вещественной части комплексного показателя преломления, а наоборот увеличивает ее.

Для второй серии экспериментов использовались образцы, изготовленные из аналогичных шайб, но с увеличенной концентрацией. В одну

пластину пенопласта с шагом по горизонтали 0,5 см, а по вертикали 1 см было вставлено 1200 шайб. Всего изготовлено четыре пластины.

На рисунке 12 приведены зависимости амплитуды и фазы коэффициента прохождения на интервале от 85 МГц до 22 ГГц. Более подробно рассмотрен интервал от 6 ГГц до 20 ГГц, на данном интервале имеет место уменьшение набега фазы, а комплексный показатель преломления $n=0.46+0.09i$.

Анализ результатов показал, что увеличение концентрации элементов приводит к расширению полосы частот, для которых наблюдается отрицательный фазовый набег. Также увеличение количества слоёв приводит к уменьшению вещественной части показателя преломления, при этом мнимая его часть возрастает.

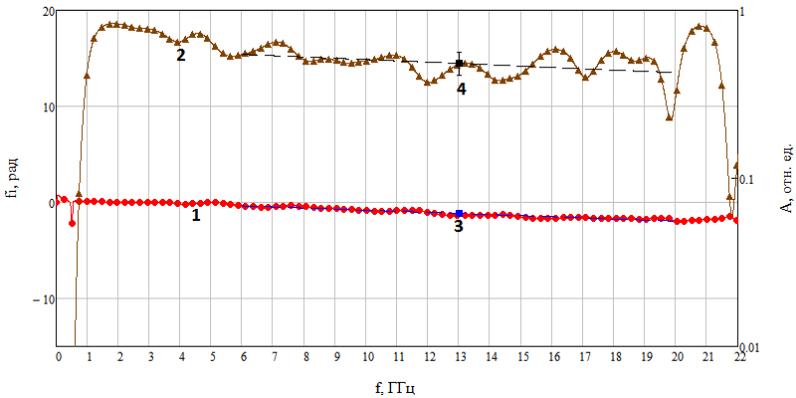


Рисунок 12 – Зависимость амплитуды (2) и фазы (1) прошедшего сигнала от частоты для одного слоя колец толщиной 1 см, линейная регрессия фазы (3), линейная регрессия амплитуды (4)

Стоит заметить, что уменьшение вещественной части показателя преломления напрямую связано с увеличением его мнимой части. Уменьшение фазового набега происходит только при наличии затухания в образце. Это происходит за счет сильных интерференционных полей, возникающих в ближней зоне пространственной решетки. Поскольку энергия падающей волны расходуется на возникновение ближних полей вокруг каждого элемента. Возникают сложные перекрывающиеся интерферирующие поля, которые взаимодействуют друг с другом. В конечном итоге именно индуцированное ближнее поле препятствует нарастанию фазы, и даже компенсирует фазовый набег, приобретенный до слоя.

Так же в данной главе приводятся результаты исследования по возможному применению метаматериала с показателем преломления $0 \leq \text{Re}(n) < 1$. Использование композиционного материала для уменьшения ЭПР целей поясняется на примере шара с покрытием.

В численном эксперименте доказано, что эффективная площадь рассеяния (ЭПР) шара, покрытого метаматериалом (с показателем преломления

$n=0,3+0,1i$) составляет 70 – 90% по отношению к ЭПР шара без покрытия. в диапазоне частот 5 – 11 ГГц, а для покрытия с $n=0,5+0,1i$ 42 – 60%, что демонстрирует перспективу применения разработанного метаматериала для сокрытия целей.

Таким образом, экспериментально доказано, что повышение концентрации кольцевых проводников при одновременном уменьшении толщины материала обеспечивает получение эффективного показателя преломления порядка $n=0,46+0,09i$ уже в сверхширокой полосе вплоть до 14 ГГц. Этот результат имеет важное значение для создания покрытий, уменьшающих эффективную площадь рассеяния объектов.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

В настоящей работе предлагается новый конструктивный подход к созданию широкополосных метаматериалов, на основе использования простейших кольцевых проводников малых размеров. Показано, что в создании структур с отрицательным показателем преломления важную роль играет учет взаимодействия реактивных полей ближней зоны, которое для слоистых структур из кольцевых проводников оказывается оптимальным. Впервые показано, что создание метаматериалов оказывается, не связано с использованием резонансных эффектов.

С использованием математического пакета CST Microwave Studio был теоретически рассчитан, а далее практически изготовлен макет, содержащий определенным образом расположенные кольцевые проводники в вспененном полистироле как в среде заполнения. Экспериментальные исследования на разработанной измерительной установке в диапазоне 2,5-22 ГГц показали, что в достаточно широкой полосе частот (порядка 700 МГц) достигнуто усреднённое значение показателя преломления порядка $n=-3,84+i1,8$. Таким образом, в работе предложено принципиально новое решение, основанное на электродинамическом подходе с учетом ближнепольного взаимодействия вкраплений из замкнутых проводников. Получаемый материал с отрицательным показателем преломления в вещественной части, превосходит все известные структуры как по широкополосности, так и по достигаемому значению показателя преломления. Кроме того, показано, что повышение концентрации кольцевых проводников при одновременном уменьшении толщины материала обеспечивает получение эффективного показателя преломления порядка $n=0,46+i0,09$ уже в полосе от 6 ГГц до 20 ГГц. Этот результат имеет важное значение для создания покрытий, уменьшающих эффективную площадь рассеяния металлических объектов.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Якубов В. П. Искусственные метаматериалы и радиотомография / В. П. Якубов, **А. С. Мироньчев**, А. Г. Андрейцов, И. О. Пономарева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9. – С. 17–20. – 0,2 / 0,05 а.л.
в переводной версии журнала:

Yakubov V. P. Artificial metamaterials and radio tomography / V. P. Yakubov, **A. S. Mironchev**, A. G. Andreitsov, I. O. Ponomareva // Russian Physics Journal. – 2011. – Vol. 53, is. 9. – P. 895–899. (*Web of Science*)

2. **Мироньчев А. С.** Многократные переотражения и фокусировка волн в слое метаматериала / А. С. Мироньчев, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 59, № 8. – С. 123–128. – 0,42 / 0,21 а.л.
в переводной версии журнала:

Miron'chev A. S. Multiple Re-reflections and focusing of waves by a metamaterial layer / A. S. Miron'chev, V. P. Yakubov // Russian Physics Journal. – 2016. – Vol. 59, is. 8. – P. 1261–1267. – DOI 10.1007/s11182-016-0900-y (*Web of Science*)

3. Якубов В. П. Фокусировка с использованием метаматериала / В. П. Якубов, **А. С. Мироньчев** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9/2. – С. 84–85. – 0,18 / 0,09 а.л.

4. **Мироньчев А. С.** Суперлинза из метаматериала для радиоволновой томографии / А. С. Мироньчев, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 190–192. – 0,25 / 0,13 а.л.

5. **Мироньчев А. С.** Многократные переотражения в слое метаматериала / А. С. Мироньчев, А. В. Горст, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/2. – С. 97–101. – 0,3 / 0,1 а.л.

6. Запасной А. С. Применение тепловизионной съёмки с БПЛА для контроля популяции диких животных / А. С. Запасной, **А. С. Мироньчев**, С. Н. Воробьёв, А. В. Клоков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 42–44. – 0,24 / 0,06 а.л.

7. Клоков А. В. Исследование структуры ходов подземных животных методами геолокации / А. В. Клоков, **А. С. Мироньчев**, А. С. Запасной, Н. С. Москвитина, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 45–47. – 0,22 / 0,04 а.л.

8. Запасной А. С. Пространственный интерференционный масштаб и его роль в ближнепольной диагностике биологических тканей и сред / А. С. Запасной, В. П. Беличенко, **А. С. Мироньчев** // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 14–17. – 0,46 / 0,16 а.л.

9. **Мироньчев А. С.** Исследование высоты снежного покрова и толщины торфяной залежи олиготорфного болота методом геолокации / А. С. Мироньчев, А. В. Клоков, А. С. Запасной, Е. А. Дюкарев, С. В. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 12/3. – С. 108–112. – 0,33 / 0,06 а.л.

Публикации в сборниках материалов конференций, индексируемых Web of Science или Scopus:

10. **Mironchev A. S.** Broadband measurement of the reflective properties of natural and artificial radiomaterials / A. S. Mironchev, A. V. Klokov, A. V. Gorst // IEEE. 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo) : Conference Proceedings. Sevastopol, Russia, September 07–13, 2014. – New York, 2014. – P. 702–703. – 0,25 / 0,08 а.л. (*Web of Science*)

11. Belichenko V. Numerical modeling and experimental investigation of the breadboard model of a near-field interference microscope / V. Belichenko, A. Zapasnoy, **A. Mironchev** // MATEC Web of Conferences. – Courtaboeuf, 2016. – Vol. 79 : 7th Scientific Conference on International Participation «Information – Measuring Equipment and Technologies» (IME&T 2016). Tomsk, Russia, May 25–28, 2016. – Article number 01016. – 8 с. – DOI: 10.1051/mateconf/20167901016. – 0,36 / 0,12 а.л. (*Web of Science*)

12. **Mironchev A.** Near-field interaction of closed cells for metamaterial creation / A. Mironchev, A. Gorst // MATEC Web of Conferences. – Courtaboeuf, 2016. – Vol. 79: 7th Scientific Conference on International Participation «Information-Measuring Equipment and Technologies» (IME&T 2016). Tomsk, Russia, May 25–28, 2016. – Article number 01064. – 9 с. – DOI: 10.1051/mateconf/20167901064. – 0,38 / 0,19 а.л. (*Web of Science*)

13. Belichenko V. P. The technology of the near-field interference microwave sensing / V. P. Belichenko, A. S. Zapasnoy, **A. S. Mironchev**, P. V. Shestakov // Solid State Phenomena. – Zurich, 2016. – Vol. 870 : International Conference on Industrial Engineerin: materials science forum. Chelyabinsk, Russia, May 19–20, 2016. – P. 730–734. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.730. – 0,4 / 0,1 а.л. (*Scopus*)

14. Klokov A. V. A comprehensive study of underground animals habitat / A. V. Klokov, A. S. Zapasnoy, **A. S. Mironchev**, V. P. Yakubov, S. S. Shipilova // IOP. Journal of Physics Conference Series. – Bristol, 2016. – Vol. 671: 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference on Innovations in Non-Destructive Testing (SibTest). Altai, Russia, July 27–31, 2015. – Article number 012028. – 6 с. – DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012028. – 0,13 / 0,02 а.л. (*Web of Science*)

15. Belichenko V. P. Near-field interference microwave diagnostics / V. P. Belichenko, A. S. Zapasnoy, **A. S. Mironchev**, E. V. Matvievskiy // IOP. Journal of Physics Conference Series. – Bristol, 2017. – Vol. 881: International Conference on Innovations in Non-Destructive Testing (SibTest). Novosibirsk, Russia, June 27–30, 2017. – Article number 012014. – 5 с. – DOI: 10.1088/1742-6596/881/1/012014. – 0,28 / 0,07 а.л. (*Web of Science*)

16. Klokov A. V. Study of oligotrophic bog by ground-penetrating radar / A. V. Klokov, A. S. Zapasnoy, **A. S. Mironchev**, E. A. Dyukarev, S. V. Smirnov, S. S. Shipilova // IOP. Journal of Physics Conference Series. – Bristol, 2017. – Vol. 881 : International Conference on Innovations in Non-Destructive Testing (SibTest). Novosibirsk, Russia, June 27–30, 2017. – Article number 012013. – 5 с. – DOI: 10.1088/1742-6596/881/1/012013. – 0,32 / 0,06 а.л. (*Web of Science*)

Публикации в других научных изданиях:

17. Якубов В. П. Моделирование метаматериалов для радиодиапазона / В. П. Якубов, **А. С. Мирончев** // Информационно-измерительная техника

и технологии : сборник материалов II научно-практической конференции. Томск, 05–07 мая 2011 г. – Томск, 2011. – С. 104–105. – 0,08 / 0,04 а.л.

18. **Мироньчев А. С.** Измерение электрофизических свойств искусственных материалов / А. С. Мироньчев, А. В. Горст // Всероссийская конференция Студенческих научно-исследовательских инкубаторов : труды. Томск, 15–17 мая 2014 г. – Томск, 2014. – С. 24–26. – 0,12 / 0,06 а.л.

19. Антипов В. Б. Направленная антенна СВЧ на основе зонной пластинки / В. Б. Антипов, Ю. И. Цыганок, В. П. Якубов, **А. С. Мироньчев** // Актуальные проблемы радиофизики : труды Международной молодежной научной школы. Томск, 09–12 октября 2014 г. – Томск, 2014. – С. 6–8. – 0,13 / 0,04 а.л.

20. **Мироньчев А. С.** Метод измерения отражающих свойств поверхности космических рефлекторов и их программно-аппаратная коррекция / А. С. Мироньчев, А. В. Клоков, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Актуальные проблемы радиофизики : труды Международной молодежной научной школы. Томск, 09–12 октября 2014 г. – Томск, 2014. – С. 25–28. – 0,16 / 0,04 а.л.

21. **Мироньчев А. С.** Частотно-временная фильтрация сигналов при измерении параметров плоскостойких сред / А. С. Мироньчев, В. П. Якубов, А. В. Горст // Информационно-измерительная техника и технологии : материалы V научно-практической конференции с международным участием. Томск, 19–23 мая 2014 г. – Томск, 2014. – С. 176–180. – 0,3 / 0,1 а.л.

22. **Мироньчев А. С.** Моделирование композиционного метаматериала для радиодиапазона / А. С. Мироньчев, В. П. Якубов, А. В. Клоков, С. Э. Шипилов, А. В. Горст // Электронные средства и системы управления : материалы докладов X Международной научно-практической конференции. Томск, 12–14 ноября 2014 г. – Томск, 2014. – Ч. 1. – С. 146–148. – 0,18 / 0,04 а.л.

23. Клоков А. В. Аппаратное и программное обеспечение высокого усиления космических рефлекторов в широкой полосе частот / А. В. Клоков, **А. С. Мироньчев**, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: материалы III Научно-технической конференции молодых специалистов ОАО ИСС, посвященной 55-летию со дня основания ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева», 50-летию успешного пуска первой ракеты-носителя «Космос-3», 90-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Железногорск, 10–12 сентября 2014 г. – Железногорск, 2014. – С. 134–136. – 0,2 / 0,05 а.л.

24. **Мироньчев А. С.** Влияние многократных переотражений на фокусировку излучения плоской линзой из метаматериала / А. С. Мироньчев // XII Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов : труды. Томск, 12–13 июня 2015 г. – Томск, 2015. – С. 33–34. – 0,08 а.л.

25. **Мироньчев А. С.** Радарное измерение торфяных залежей / А. С. Мироньчев // XII Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов : труды. Томск, 12–13 июня 2015 г. – Томск, 2015. – С. 35–37. – 0,11 а.л.

26. Клоков А. В. Исследование пространственного распределения высоты снежного покрова и толщины торфяной залежи олиготрофного болота с помощью георадара ОКО-2 / А. В. Клоков, **А. С. Мироньчев**, Е. А. Дюкарев, С. В. Смирнов //

XI Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы докладов. Томск, 21–23 сентября 2015 г. – Томск, 2015. – С. 198–199. – 0,12 / 0,03 а.л.

27. **Мироньчев А. С.** Дифракционный предел и неоднородные волны в метаматериале (Diffraction limit and the evanescent waves in metamaterial) / А. С. Мироньчев, В. П. Якубов // Информационно-измерительная техника и технологии : материалы VI Научно-практической конференции с международным участием. Томск, 27–30 мая 2015 г. – Томск, 2015. – С. 157–164. – 0,16 / 0,08 а.л.

28. Беличенко В. П. Ближнепольная интерференционная СВЧ диагностика / В. П. Беличенко, А. С. Запасной, **А. С. Мироньчев** // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 26-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2016). Севастополь, 04–10 сентября 2016 г. – Севастополь, 2016. – Т. 8.6. СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты. 6а. Электромагнитная и радиационная стойкость материалов и электронной компонентной базы. 8а. Микроволновые технологии и техника в биологии и медицине. – С. 1838–1844. – 0,37 / 0,13 а.л.

29. Клоков А. В. Геолокация торфяников / А. В. Клоков, А. С. Запасной, **А. С. Мироньчев**, Е. А. Дюкарев, С. В. Смирнов, С. С. Шипилова // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 26-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2016). Севастополь, 04–10 сентября 2016 г. – Севастополь, 2016. – Т. 11.9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн. – С. 2439–2445. – 0,32 / 0,06 а.л.

30. Барков Ф. А. Определение диэлектрической проницаемости семян / Ф. А. Барков, **А. С. Мироньчев**, В. П. Якубов, С. И. Михайлова // Актуальные проблемы радиофизики : труды Международной молодежной научной школы. Томск, 25–26 сентября 2017 г. – Томск, 2017. – С. 13–17. – 0,25 / 0,06 а.л.

31. Горст А. В. Модель структуры метаматериала для микроволн / А. В. Горст, **А. С. Мироньчев**, В. П. Якубов // Актуальные проблемы радиофизики : труды Международной молодежной научной школы. Томск, 25–26 сентября 2017 г. – Томск, 2017. – С. 29–34. – 0,25 / 0,08 а.л.

Тираж 100 экз. Заказ 59.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.