

Рыженко Дмитрий Сергеевич

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ
ВОЛНОВОДНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Митрохин В.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Раевский С.Б.

кандидат технических наук, доцент.
Семенов С.Г.

Ведущая организация: ФГУП «Федеральный научно-
производственный центр Научно-
исследовательский институт измерительных
систем им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний
Новгород

Защита диссертации состоится 8 декабря 2011 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.141.11. в зале Ученого совета Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Адрес: 105005, Москва, 2-я Бауманская д.5. МГТУ им. Н.Э.Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан 7 ноября 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.11

доктор технических наук, профессор

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1988110

Рыженко Д. С. Применение мет

- III

И.Б. ВЛАСОВ

11

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Разработка современных радиотехнических систем, используемых в технике радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии, оборонных областях радиоэлектроники требует новых принципов в построении функциональных устройств и антенн, уменьшения их массогабаритных параметров одновременно с обеспечением широкополосности, надежности и многофункциональности. Удовлетворение таким требованиям невозможно без реализации новых физических явлений, материалов и технологий. В последние годы разработчиков СВЧ устройств и антенн всё больше привлекают новые материалы и среды с необычными электродинамическими свойствами. Это так называемые метаматериалы, включая киральные и перколяционные среды, оптомагнетики, фотонные и электронные кристаллы.

Диэлектрическая проницаемость ϵ и магнитная проницаемость μ в таких средах могут принимать очень малые (включая ноль) или очень большие значения, а также в определенном частотном диапазоне быть отрицательными (иногда одновременно). Последнее свойство позволяет реализовать материальную среду с отрицательным показателем преломления. В этом случае преломленный луч расположен не как обычно, а по направлению, симметричному относительно нормали к обычному направлению. Из этого факта следует возможность создавать необычные оптические устройства. Особая роль в реализации уникальных электродинамических свойств метаматериалов при конструировании устройств СВЧ принадлежит средам, объединенным в пары с разными знаками ϵ и μ . Уникальность электродинамических свойств таких спаренных структур определяется поведением электромагнитного поля в форме поверхностных волн на границе раздела сопрягаемых сред.

Использование указанных структур приводит к появлению таких особенных явлений как резонанс, отсутствие отражений, полное туннелирование волны и прозрачность. Достижение прозрачности пытаются реализовать с помощью сопрягаемых пар метаматериалов в виде сферических или цилиндрических оболочек.

Свойство парных структур используется при построении электрически малых по размерам волноводов, а на их основе и резонаторов, фазовращателей, направленных ответвителей и рассеивающих структур с резонансными свойствами, независящими от их эффективного физического размера. В антеннах малых электрических размеров применение парных метаматериалов позволяет скомпенсировать реактивную мощность, запасенную в ближней зоне излучателя в широкой полосе частот.

Размещение излучателей в единожды или дважды отрицательных средах дает возможность формирования остронаправленного излучения при достаточно широкой диаграмме направленности излучателя. Кроме того, такие структуры позволяют дифрагировать электромагнитному полю через электрически малое отверстие благодаря формированию указанной выше

структурой вытекающих волн. Метаматериалы способствуют созданию антенн поверхностных волн, в том числе обратного излучения. С помощью применения метаматериалов с нулевым показателем преломления возможно создание синфазной апертуры, формирующей остронаправленное излучение. С помощью изолятора на основе метаматериала с отрицательной магнитной проницаемостью возможно подавление взаимного влияния между соседними излучателями в фазированной антенной решетке. Известна методика дисперсионной компенсации в линии передачи, использующей метаматериал на основе дважды отрицательной среды.

При разработке малогабаритных заградительных и полосовых фильтров СВЧ обладающих малыми потерями в рабочей полосе частот и высокой частотной избирательностью используются копланарные волноводы с периодическими включениями щелевых кольцевых резонаторов и металлических стержней.

Для миниатюризации микрополосковых антенн обычно используются диэлектрические подложки с большим значением диэлектрической проницаемости ϵ . Однако, в этом случае значительно повышается концентрация электрического поля ближней зоне антенны, что приводит к низкой интенсивности излучения из-за большого реактивного поля и узкой полосы пропускания. Эти недостатки могут быть значительно уменьшены или даже исключены с помощью применения подложек из магнитно – диэлектрического материала с высоким значением магнитной проницаемости μ , что приводит к минимизации реактивного поля и к достаточно хорошему согласованию в относительно широкой полосе частот

В микрополосковых антеннах с круглым полоском перспективным является использование подложки с неоднородным заполнением, состоящим из кольца обычного диэлектрика и сердцевины из метаматериала. Подбирая коэффициент заполнения метаматериалом и диэлектрическую проницаемость кольца ϵ , создаются условия возбуждения собственного типа волны с улучшенными характеристиками согласования, излучения и миниатюризации микрополосковой антенны этого типа.

Таким образом, тема диссертации «Применение метаматериалов при разработке волноводных СВЧ устройств» является **актуальной**.

Целью диссертации является исследование путей создания волноводных СВЧ устройств с улучшенными диапазонными и функциональными свойствами за счет применения метаматериалов.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- анализа состояния теории и практического применения электродинамических свойств метаматериалов в функциональных устройствах и антеннах СВЧ диапазона;

- оценки результатов применения метаматериалов и композитных сред в режиме переходного поля в том числе с учетом физических явлений на основе нулевого или близкого к нулю показателя преломления среды;

- анализа принципов построения композитных сред и метаматериалов с отрицательными диэлектрическими и магнитными проницаемостями;
- исследование электродинамических свойств коаксиального, круглого, прямоугольного и копланарного волноводов с частичным заполнением анизотропным метаматериалом;
- исследование электродинамических свойств метаматериалов с нулевым показателем преломления с целью формирования синфазной апертуры при узконаправленном излучении;
- создание макетных образцов заградительных и полосовых фильтров на основе волноведущих структур и антенн осевого излучения с использованием метаматериалов.

Методы исследования. При выполнении работы использованы методы собственных функций, вычислительные методы технической электродинамики, методы компьютерной обработки данных натурных экспериментальных измерений.

Научная новизна. В результате выполнения работы:

- обобщены и проанализированы принципы построения искусственной среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью, включая запредельные области квазистатического поля регулярных и неоднородных волноводов, а также области ближнего поля антенн малых электрических размеров;
- обобщены и проанализированы принципы построения композитной среды с отрицательной магнитной проницаемостью, включая диамагнитный режим подмагниченных ферромагнетиков;
- проведен электродинамический анализ и приближенный расчет волновых параметров и характеристик коаксиального, круглого, прямоугольного и копланарного волноводов с частичным заполнением анизотропным метаматериалом;
- экспериментально подтверждена возможность создания синфазного раскрыва с помощью плоской линзы из метаматериала с нулевым коэффициентом преломления.

Практическая значимость. Результаты исследований позволили:

- создать заградительные фильтры на основе коаксиального и копланарного волноводов малых электрических размеров;
- создать волноводные устройства малых электрических размеров для реализации миниатюрных резонаторов, фильтров, направленных ответвителей, фазовращателей;
- создать плоские линзы для формирования синфазной апертуры в пирамидальных рупорах;
- создать полосовые фильтры малых электрических размеров на основе круглых, прямоугольных и копланарных волноводов с частичным заполнением анизотропным метаматериалом.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы были реализованы в НИР «Анализ

современного состояния технологий использования метаматериалов; разработка математических моделей и алгоритмов для исследования электродинамических свойств метаматериалов», шифр 1.63.08, № г.р. 01200901182, Инв. № 02200901169, в НИЦ РКО 4 ЦНИИМО: при выполнении плановых НИР; при разработке ТТХ по профилю тематики НИЦ РКО; при совершенствовании научно-методической базы НИЦ РКО. Результаты исследований электродинамических свойств метаматериалов использованы в ходе выполнения НИР на спецтему «Ивушка», а также в учебном процессе на кафедре «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э.Баумана, подтвержденные соответствующими актами о внедрении. Также заключены государственные контракты № П117 от 12 апреля 2010 г. «Исследование процессов построения метаматериалов на основе композитных сред для функциональных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов» и № 14.740.11.1335 от 27 июня 2011 г. «Использование метаматериалов, киральных сред и фотонных кристаллов в приборах СВЧ устройств».

Также поданы две заявки на патенты:

1. Полосовой фильтр СВЧ диапазона, регистрационный номер 2011130455.
2. Заградительный фильтр СВЧ диапазона, регистрационный номер 2011130456

По заявке номер 2011130455 принято решение о выдаче патента на полезную модель.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика электродинамического анализа принципов построения метаматериалов с отрицательной диэлектрической проницаемостью, включая запредельные области квазистатического поля регулярных и неоднородных волноводов, а также области ближнего поля антенн малых электрических размеров;
- методика электродинамического анализа принципов построения метаматериалов с отрицательной магнитной проницаемостью, включая диамагнитный режим подмагниченных ферромагнетиков;
- методика электродинамического анализа и приближенного расчета волновых параметров и характеристик волноводов с частичным заполнением анизотропным метаматериалом;
- результаты экспериментальных исследований волноводных СВЧ устройств и антенн, содержащих анизотропные метаматериалы, полученные при использовании созданных макетных образцов

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях:

Студенческих научно-технических конференциях: «Студенческая научная весна (2005 – 2008) г.г. МГТУ им. Н.Э.Баумана; на 8-й (2006 г.), 9-й (2007 г.), 11-й (2009 г.), 12-й (2010 г.) Научно-технических конференциях «Медико-технические технологии на страже здоровья»; на V-й (2007 г.), VII-й (2009г.) Молодежных научно-технических конференциях «Радиолокация и

связь – перспективные технологии»; на V-й (2006 г.), VI-й (2007 г.), X-й (2011 г.) Международных научно-технических конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов»; на Конкурсе научных работ студентов университета, 2006 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечиваются корректным применением метода разделения переменных при решении уравнений Гельмгольца в декартовом, цилиндрическом и сферическом базисах, обоснованностью упрощающих допущений, а также сравнением с результатами математического и физического моделирования.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 110 наименований. Основная часть работы изложена на 137 страницах, содержит 67 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обосновывается актуальность темы, определяются цели и задачи работы, отмечаются научная новизна и практическая значимость, характеризуются методы исследования; приводятся сведения об апробации работы и структуре диссертации; формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы приведен анализ работ по применению метаматериалов в радиоэлектронике.

Искусственные композитные среды и их электродинамические свойства стали предметом исследований ещё в 19 веке, но значительный интерес к ним повысился при опубликовании статьи В.Г. Веселаго. Большой вклад в развитие теории и экспериментальных исследований композитных сред, в том числе метаматериалов ещё до появления работы внесли советские ученые Н.А. Капцов, Л.И. Мандельштам, Л.А. Микаэлян, Д.В. Сивухин, Р.А. Силин, В.Е. Пафомов, Я.Н.Фельд и Л.С. Бененсон, В.Н. Агранович и В.Л. Гинзбург. Особенно бурное развитие исследований метаматериалов продолжилось после работы Дж. Пендри. Следует отметить, что прообразы двойных разомкнутых кольцевых рамок, использованные в на самом деле были предложены ранее в работе Н.В. Костина и В.В. Шевченко. В 80-х, 90-х годах прошлого века в России зарождаются мощные научные школы по метаматериалам в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН и Институте радиоэлектроники РАН. Из зарубежных ученых и специалистов, внесших значительный вклад в теорию и практику метаматериалов следует отметить Е. Коха, С.А. Щелкунова и Г. Фрииса, Дж. Пендри, Д. Смита, Р. Шелби, Р. Цюлковского и др. Результаты опубликованных работ по метаматериалам подтвердили необычные электродинамические свойства последних. Однако в

литературных источниках, на наш взгляд, недостаточно полно показано применение этих свойств при разработке конкретных конструкций волноводных СВЧ устройств и антенн.

Вторая глава диссертационной работы посвящена материальным и волновым параметрам композитных сред в режиме переходного поля. Приведены основные положения электронной теории Лоренца-Друде, используемые при выводе приближенных соотношений для расчета диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериалов. Показано что в среде с нулевым показателем преломления электромагнитное поле является квазистатическим.

Если электромагнитное волновое поле в дважды положительной среде $\epsilon > 0, \mu > 0$ (или в дважды отрицательной среде $\epsilon < 0, \mu < 0$) переходит в состояние квазистатического в эpsilon отрицательной $\epsilon < 0, \mu > 0$ (или в μ отрицательной, $\epsilon > 0, \mu < 0$) среде (или наоборот от квазистатического в состоянии волнового), то такое поле называют переходным. Точка перехода характеризуется тем, что в ней либо $\epsilon = 0$, либо $\mu = 0$, либо $n = 0$, либо фазовая постоянная переходит через нуль.

У элементарного электрического диполя переход от квазистатического поля к волновому осуществляется на критическом сечении, разделяющем поле ближней зоны от поля промежуточной зоны. При этом, диэлектрическая проницаемость области ближней зоны с отрицательного значения переходит к положительному значению в промежуточной зоне, проходя через нуль в критическом сечении. Для компенсации реактивного поля ближней зоны элементарного электрического диполя с целью увеличения эффективности излучения его надо либо разместить внутри среды (диэлектрического шара) с $\epsilon > 0, \mu > 0$ и размером радиуса сферы меньше или равного критическому сечению, либо окружить кольцом из метаматериала с диэлектрической проницаемостью $\epsilon < 0, \mu > 0$ и внутренним радиусом, равным радиусу критического сечения. Ближняя зона элементарного электрического диполя является областью с отрицательным значением диэлектрической проницаемости.

В главе проводится анализ свойств и практических применений метаматериалов в режиме, когда ϵ, μ очень малы и стремятся к нулю в определенном частотном переходном режиме электромагнитного поля.

В третьей главе рассматриваются принципы построения искусственной среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Одним из основных принципов является структура тонких металлических стержней радиуса r в виде решетки с периодом $a \ll \lambda$, ориентированных параллельно вектору $\mathbf{E}$ падающей на нее плоской электромагнитной волны. Тогда, действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' без учета потерь вычисляется по формуле $\epsilon' = 1 - f_n^2 / f^2$, где f - рабочая частота, $f_n = c / [a \sqrt{2\pi \ln(a/r)}]$ плазменная частота. Такая структура ведет себя аналогично плазменно подобной среде, причем f_n из-за условия тонких стержней смещается в область сверхвысоких

частот. Это смещение происходит из-за уменьшения эффективного числа свободных электронов в единице объема и увеличения эффективной массы последних за счет магнитного поля, возникающего в окрестности проводника под действием наведенного электрического поля. Как видим, при $f < f_{кр}$ получаем $\varepsilon' < 0$. Композитная среда с $\varepsilon' < 0$ может быть построена на основе волноведущих структур работающих в закритическом режиме. Собственные волны полых волноводов прямоугольного и круглого сечений распространяются с фазовой постоянной $\beta = (\omega/c)\sqrt{1 - f_{кр}^2/f^2}$, где ω - круговая частота, c - скорость света, $f_{кр}$ - критическая частота. Как видим, эквивалентная диэлектрическая проницаемость волноводной полости может быть записана в виде $\varepsilon' = 1 - f_{кр}^2/f^2$. Роль плазменной частоты, здесь аналогично рассмотренному выше, играет $f_{кр}$. Для низших типов волн имеем:

$$\varepsilon'_{H_{10}} = 1 - c^2/(4a^2 f^2), \varepsilon'_{H_{11}} = 1 - c^2/(1,63a^2 f^2)$$

Для конического волновода «постоянная» распространения Γ определяется соотношениями:

$$\Gamma = -\frac{kR'_\eta(kr)}{R_\eta(kr)}, \quad R_\eta(kr) = kr \begin{cases} h_\eta^{(2)}[(kr)_{кр}] j_\eta(kr), & kr \leq (kr)_{кр} \\ j_\eta[(kr)_{кр}] h_\eta^{(2)}(kr), & kr \geq (kr)_{кр}, \end{cases}$$

где $j_\eta(kr)$, $h_\eta^{(2)}(kr)$ - сферические функции Бесселя первого рода η -ого порядка и сферические функции Ханкеля второго рода η -ого порядка соответственно; $(kr)_{кр} = \sqrt{\eta(\eta+1)}$ - критические сечения соответствующих типов волн; η - собственные значения, определяемые из граничных условий:

$$P'_\eta(\cos\theta)|_{\theta=y} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial\theta} P'_\eta(\cos\theta)|_{\theta=y} = 0$$

для E_{mn} и H_{mn} типов волн соответственно, γ - половина угла раствора конуса, $P'_\eta(\cos\theta)$ - присоединенные функции Лежандра первого рода.

Для низшего типа волны H_{11} при $\gamma = 45^\circ$ имеем из граничных условий $\eta = 2$, т.е. $(kr)_{кр} = 6$. Поступая аналогично прямоугольному и круглому волноводам получаем следующие выражения для эквивалентной диэлектрической проницаемости заперделной конической полости.

$$\varepsilon'_{H_{11}} = -[j_1(\sqrt{6} f/f_{кр})/j_2(\sqrt{6} f/f_{кр}) - 2/(\sqrt{6} f/f_{кр})]^2, f < f_{кр}$$

$$\varepsilon'_{H_{11}} = \left\{ \sqrt{6} f/f_{кр} \right\}^2 \cdot [j_2^2(\sqrt{6} f/f_{кр}) + n_2^2(\sqrt{6} f/f_{кр})]^{-2}, f > f_{кр},$$

где $n_2(x)$ - сферические функции Неймана.

Аналогично волноводной среде образование области с отрицательным значением ε возможно в неоднородных электродинамических структурах ниже критического сечения (конические, радиальные, пирамидальные, биконические структуры, а также область ближнего поля элементарного электрического диполя).

Отрицательная ε' может быть получена в композитной среде на основе отрезков линии передачи при определенном сочетании значений распределенных и сосредоточенных параметров, включаемых в линию с периодом $d \ll \lambda$. Тогда $\varepsilon' \approx \varepsilon_m - 1/(\varepsilon_0 \omega^2 L^- d)$, $\mu' \approx \mu_m - 1/(\mu_0 \omega^2 C^- d)$, где L^- параллельно включаемая сосредоточенная индуктивность, C^- последовательно включаемая сосредоточенная емкость, ε_m , μ_m - относительные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей линии передачи. Здесь мы получаем искусственную среду и с отрицательным μ' .

Четвертая глава посвящена принципам построения композитной среды с отрицательной магнитной проницаемостью. Их основой является гипотеза А. Ампера: магнитные свойства отдельной молекулы вещества описываются магнитным моментом $\mathbf{p}''$, создаваемым круговым молекулярным током. При концентрации этих токов N намагниченность вещества определяется как $\mathbf{M} = N\mathbf{p}''$. Для подмагниченных парамагнетиков из решения уравнения движения намагниченности $\mathbf{M}$, получаем в случае малых потерь:

$$\mu' = 1 - \chi_0'' \frac{\omega_0^2 (\omega^2 - \omega_p^2)}{(\omega_p^2 - \omega^2) + 4\omega^2 / \tau_2^2}, \quad \mu'' = \chi_0'' \frac{2\omega_0^2 \omega / \tau_2}{(\omega_p^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 / \tau_2^2},$$

где $\chi_0'' = M_0 / H_0$ - магнитная восприимчивость в постоянном магнитном поле, $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$ - ларморова частота прецессии, γ - гиромагнитное отношение, τ_2 - время поперечной спин-спиновой релаксации, ω_p - резонансная частота. В зависимости $\mu' = f(\omega)$ имеется область с $\mu' < 0$, соответствующая диамагнитному режиму.

Искусственная композитная среда на основе периодических включений проводящих частиц малых электрических размеров (сфер, круговых и эллиптических цилиндров, вытянутых и сплюснутых сфероидов, плоских дисков) представляет собой диамагнетик с отрицательным значением магнитной восприимчивости.

Отрицательная магнитная проницаемость композитного магнетика может быть получена на основе периодических структур элементарных рамок прямоугольной или круглой форм (искусственных молекул), поскольку для такой среды $\mu' = 1 - N\mu_0^2 S^2 / [L_p(1 - \omega_p^2 / \omega^2)]$, где S - площадь рамки, $\omega_p = 1/\sqrt{L_p C_p}$ - резонансная частота рамки; L_p , C_p - индуктивность и емкость рамки.

Наибольшее распространение получила композитная среда с $\mu' < 0$ на основе периодических структур двойных щелевых кольцевых резонаторов (SRR) для которой:

$$\mu = 1 - \frac{\pi^2 / a^2}{1 - 3/(\pi^2 \mu_0 \omega^2 C r^3) + i2\sigma / (\omega r \mu_0)},$$

где C – емкость, приходящаяся на единицу расстояния между кольцами внутри SRR, a – расстояние между SRR в решетке, σ – удельная проводимость колец, r – радиус внешнего кольца SRR. Отрицательное значение μ' возникает в диапазоне $\omega_0 < \omega < \omega_0 / \sqrt{1 - \pi^2 / a^2}$, где $\omega_0 = \sqrt{3 / (\mu_0 C r)} / (2\pi^2 r)$ – резонансная частота SRR.

Удобным для практических применений композитной среды с $\mu' < 0$, является ее выполнение на основе микрополосковой печатной технологии с использованием отрезков микрополосковых, щелевых и копланарных линий передачи. Тогда, как было показано в третьей главе, $\mu' < 0$ может быть получено при определенном сочетании значений распределенных и сосредоточенных параметров, включаемых в линию с периодом $d \ll \lambda$. Особенностью построения композитной среды с $\mu' < 0$ на оптических частотах является структура периодически размещаемых парных хорошо проводящих стержней при возбуждении в них антисимметричного плазменного резонанса.

Пятая глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям СВЧ устройств, содержащих метаматериалы. В результате решения уравнений Максвелла получены дисперсионные соотношения и определены волновые параметры низших типов волн (постоянная распространения, фазовая и групповая скорости, длина волны в системе, волновое сопротивление) коаксиального (рис. 1а), круглого (рис. 2а) и прямоугольного (рис. 3а) волноводов с частичным заполнением метаматериалом. Поскольку μ и ε метаматериала непосредственно входят в выражения этих параметров, то характер волнового процесса полностью определяется частотно-дисперсионными свойствами метаматериала в соответствии с принципами электронной теории Лоренца-Друде.

$$\mu = 1 - \frac{f_{pm}^2 - f_0^2}{f^2 - f_0^2 - i\gamma_m f / (2\pi)}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2 - i\gamma_e f / (2\pi)},$$

где f – рабочая частота, f_0 – резонансная частота рамки, f_{pm} , f_{pe} – плазменная магнитная и электрическая частота соответственно, γ_m , γ_e – постоянные, характеризующие магнитные и электрические потери.

Для коаксиального волновода (рис. 1а) диапазон частот, где $\mu' < 0$ оказывается запрещенным, что видно из графика зависимости коэффициента передачи S_{21} от частоты (рис. 1б). При работе круглого и прямоугольного волноводов в запердельном режиме диапазон частот, где $\mu' < 0$ оказывается «прозрачным» для распространения волн основного типа (рис. 2б, 3б). Поперечные размеры волноводов в этом случае могут быть значительно уменьшены, что позволяет осуществить волноводную миниатюризацию. Отрезки таких волноводов были использованы для построения заградительных и полосовых СВЧ фильтров (рис. 1в, 2в, 3в).

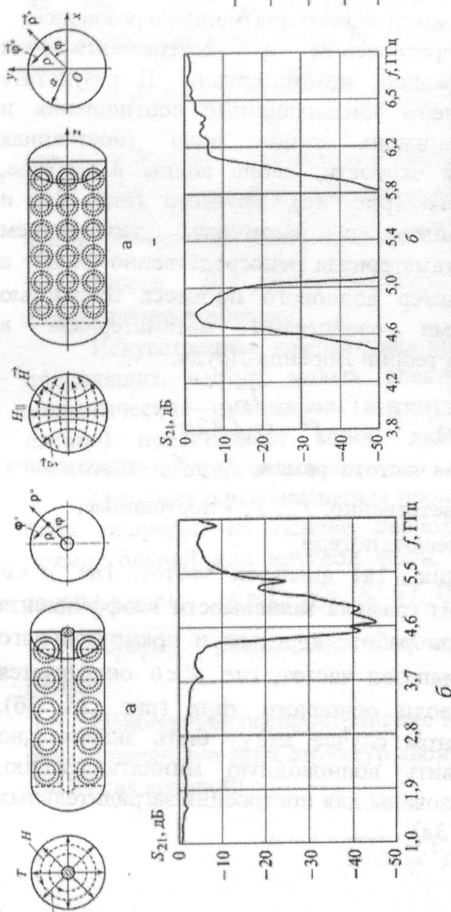


Рис. 1. Коаксиальный волновод с метаматериалом (а); зависимость S_{11} от частоты (б); фото заградительного фильтра (в)

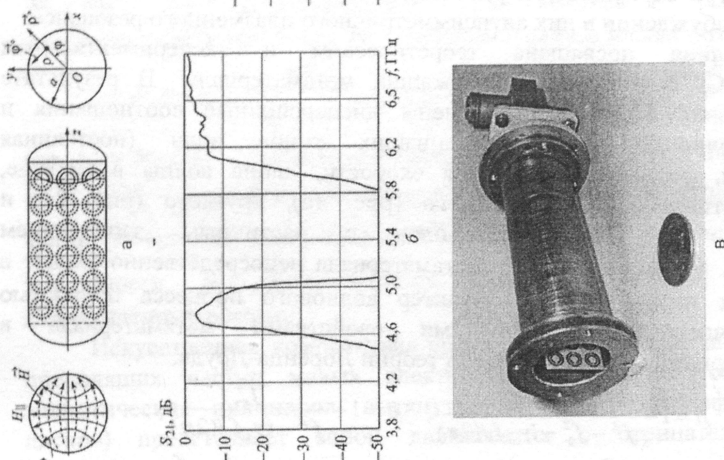


Рис. 2. Круглый волновод с метаматериалом (а); зависимость S_{21} от частоты (б); фото полосового фильтра (в)

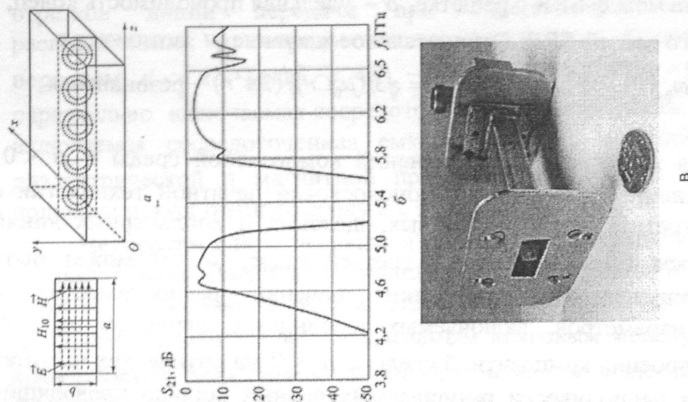


Рис. 3. Прямоугольный волновод с метаматериалом (а); зависимость S_H от частоты (б); фото полосового фильтра (в)

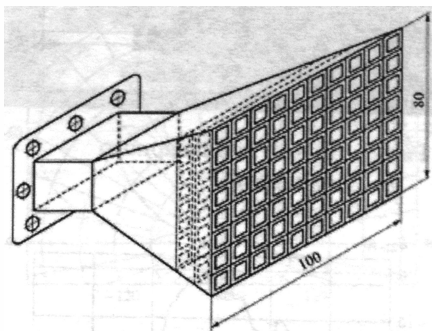


Рис. 4. Плоская линза в рупоре

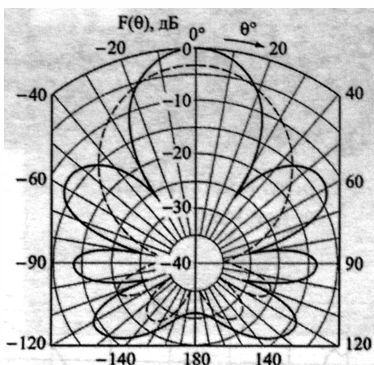


Рис. 5. ДН рупорной антенны в Н плоскости

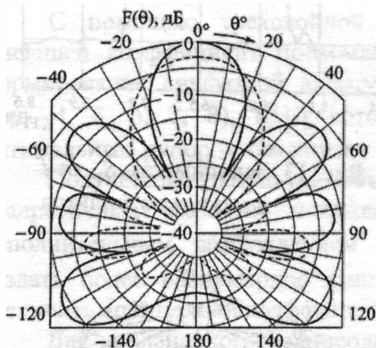


Рис. 6 ДН рупорной антенны в Е плоскости

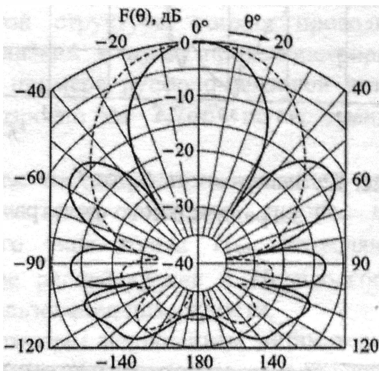


Рис.7 Нормированная ДН рупорной антенны в Н плоскости

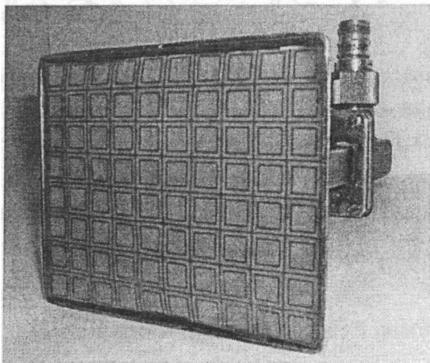


Рис. 6.8 Фото плоской линзы в пирамидальном рупоре

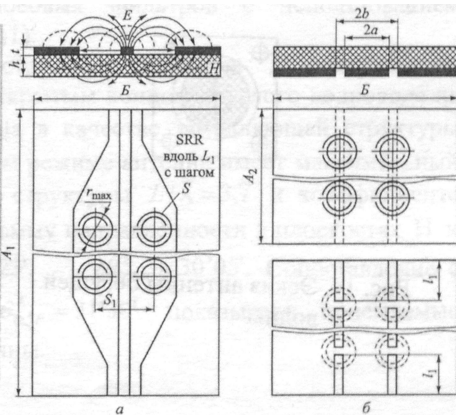


Рис. 7.9 Копланарные волноводы

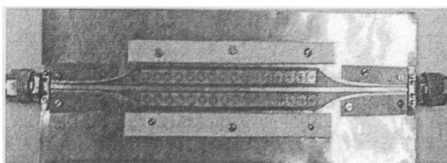


Рис. 10. Фото копланарного волновода 1

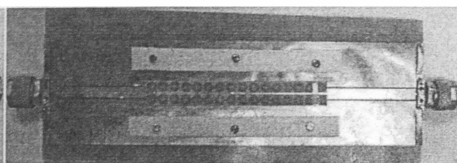


Рис. 9. 11 Фото копланарного волновода 2

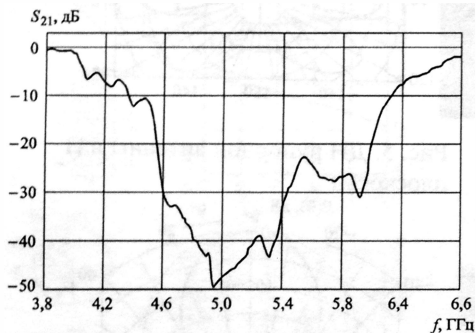


Рис. 12. Зависимость S_{21} от f заградительного фильтра

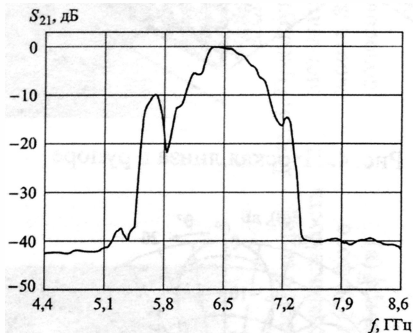


Рис. 13. Зависимость S_{21} от f полосового фильтра

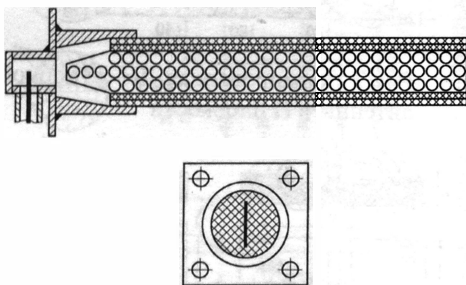


Рис. 14. Эскиз антенны бегущей волны

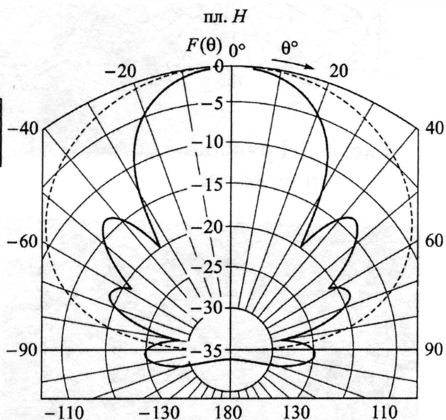


Рис. 15. ДН антенны бегущей волны в плоскости Н

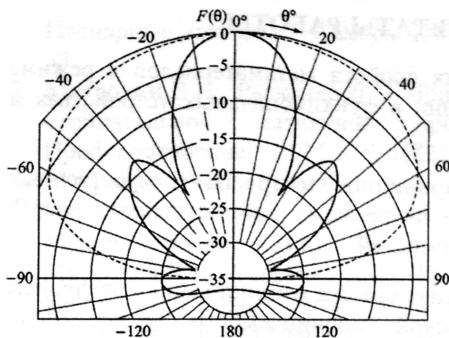


Рис. 16. ДН антенны бегущей волны в плоскости Е

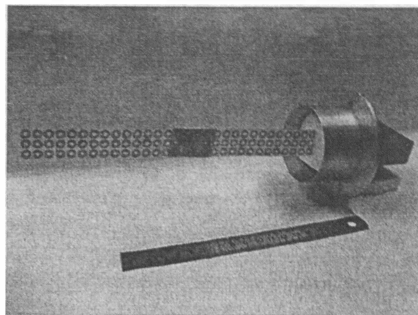


Рис. 17. Фото антенны бегущей волны

С помощью трехслойной сетчатой структуры тонких проводников имеющей коэффициент преломления близкий к нулю продемонстрировано формирование синфазной апертуры на примере рупорно-линзовой антенны (рис. 4, 5, 6, 7, 8), КНД которой возросло на $2,7\text{дБ}$ по сравнению с оптимальным рупором без линзы.

Полученный результат объясняется не только компенсацией линзой квадратичных фазовых искажений на краю раскрыва рупора, но и дополнительным возбуждением высшего типа волны H_{30} , позволяющим создать более равномерное амплитудное распределение в H -плоскости и увеличить апертурный коэффициент использования поверхности.

Для копланарного волновода с частичным заполнением метаматериалом (рис. 9), дисперсионные соотношения получены методом теории цепей и эквивалентных схем с последующим вычислением волновых параметров H -волны низшего типа. На основе отрезков такого волновода построены конструкции заградительных и полосовых фильтров с использованием микрополосковой технологии (рис. 10, 11).

Пластина из метаматериала (структура SRR на диэлектрической подложке с $\varepsilon=3,5$) при возбуждении открытым концом круглого волновода на волне H_{11} (рис. 14) была использована в качестве замедляющей структуры антенны бегущей волны. В оптимальном режиме антенна имеет максимальный КНД 14дБ при относительной длине структуры $L/\lambda=3,7$ и коэффициенте замедления $\xi=1,135$ формирует диаграмму направленности в плоскостях Н и Е (рис. 15, 16) шириной $2\theta_{0,5P}^H=35^\circ 23'$, $2\theta_{0,5P}^E=30^\circ 05'$. Сопоставление с теоретическими расчетами $2\theta_{0,5P}^H=2\theta_{0,5P}^E=31^\circ 30'$ показывает приемлемые оценки при проектировании такой антенны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ электродинамических свойств метаматериалов в режиме переходного поля при их использовании в функциональных устройствах и излучателях СВЧ диапазона.
2. Проведен анализ и систематизация принципов построения искусственных композитных сред с отрицательными значениями действительных частей диэлектрической и магнитной проницаемостей.
3. Показано, что искусственная композитная среда с отрицательным значением действительной части диэлектрической проницаемости может быть построена на основе отрезков волноведущих структур, работающих в закритическом режиме, а также на основе отрезков неоднородных электродинамических структур ниже критического сечения (конические, радиальные, пирамидальные, биконические структуры, а также область ближнего поля элементарного электрического диполя).
4. Теоретически и экспериментально исследованы электродинамические свойства коаксиального, круглого, прямоугольного и копланарного волноводов с частичным заполнением метаматериалом.
5. Разработаны заградительные и полосовые фильтры СВЧ диапазона на основе отрезков коаксиального, круглого, прямоугольного и копланарного волноводов.
6. Теоретически и экспериментально исследованы электродинамические свойства метаматериалов с нулевым показателем преломления с целью разработки устройств формирования синфазной апертуры при узконаправленном излучении электромагнитных волн.
7. Разработана плоская линза на основе периодической структуры квадратных металлических рамок и стержней, позволяющая увеличить на 3дБ КНД оптимального пирамидального рупора.
8. Разработана антенна бегущей волны в качестве замедляющей системы, в которой использована пластинчатая периодическая структура двойных разомкнутых колец на диэлектрической подложке. При относительной длине структуры $L/\lambda = 3,7$ антенна имеет КНД 14дБ .

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С., Тягунов В.А. Экспериментальные исследования СВЧ устройств, содержащих метаматериалы // X Международная НТК «Физика и технические приложения волновых процессов»: «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» :

- Пленарные доклады. – Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2011. – Т. 15. - №3. – С. 43-53.
2. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Принципы построения композитной среды с отрицательной магнитной проницаемостью // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2011. - № 1(82). – С. 3 – 17.
 3. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Материальные и волновые параметры композитных сред в режиме переходного поля // Изв. Вузов. Машиностроение. - 2011. - № 2. – С. 75 – 80.
 4. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С., Щукин С.Н. Электродинамические свойства биообъектов с киральными структурами // Сб. трудов 12-й НТК. Медико-технические технологии на страже здоровья «МЕДТЕХ-2010». –М.: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2010. – С. 9 - 15.
 5. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Принципы построения искусственной среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью // Вестник СОНИР. - 2009. - №4(26), – С. 70-77.
 6. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Использование метаматериалов в устройствах СВЧ // Вестник МГТУ. Приборостроение. Спец. вып. «Антенны и устройства радио – и оптического диапазонов». - 2009 . – С. 118-123.
 7. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Антенны зондового типа радиотермографических СВЧ установок // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. Спец. вып. «Антенны и устройства радио и оптического диапазонов». - 2009. – С. 46- 50.
 8. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Метаматериалы в антеннах радиотермографических установок // 11-я научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья»: Сборник трудов (Черногория). – М.: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С. 46-52
 9. Рыженко Д.С. Построение метаматериала на основе микрополосковой линии передач // VII Молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». 22-23 октября 2009 года. – М.: ОАО «Радиофизика», 2009. - С. 112 – 116.
 10. Рыженко Д.С. Метаматериалы – новый вид магнито – диэлектриков // «Студенческая весна. – 2008» МГТУ им. Н.Э. Баумана: Сб. тезисов докладов / Под ред. К.Е. Демихова. – М.: НТА «АПФН», 2008. –С. 4-6.
 11. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Излучение сферической антенны // «Физика и технические приложения волновых процессов» материалы МНТК: «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». –Самара: Самарский государственный университет. – 2007. – Т.10, №3. – С. 94-101
 12. Рыженко Д.С. Коэффициент направленного действия сферической антенны // V Молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь - перспективные технологии»: Сборник тезисов докладов. – М.: ОАО «Радиофизика». - 2007. – С. 126-130.
 13. Рыженко Д.С. Исследование поля сферической антенны // Студенческий научный вестник: Общеуниверситетская научно-техническая конференция

- «Студенческая научная весна – 2007». Сборник тезисов докладов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2007. – Т.IV. – С. 12-13
14. Митрохин В.Н., Рыженко Д.С. Дипольное излучение электромагнитных волн // «Физика и технические приложения волновых процессов» материалы МНТК: «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Самара: Самарский государственный университет. – 2006. – С. 126-127.
15. Рыженко Д.С. Формирование базы данных РЛС для решения задач радиолокационного лоцирования // Конкурс научных работ студентов университета: Студенческий научный вестник. Сборник тезисов докладов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – С. 7.
16. Рыженко Д.С. Исследование поля элементарного магнитного диполя // Студенческая научно-техническая конференция «Студенческая научная весна – 2006»: Сборник трудов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – С. 43-44.
17. Особенности количественной оценки эффективности биоадекватных электромагнитных воздействий / Лужнов П.В., Шамкина Л.А., Булавкин А.В., Рыженко Д.С. // 8-я научно-техническая конференция «МЕДТЕХ-2006»: Сборник трудов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – С. 17-18.
18. Рыженко Д.С., Юсова Ю.С. Обзор типов излучателей для медицинских целей // Студенческая научно-техническая конференция «Студенческая научная весна – 2005»: Сборник трудов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – С. 88-89
19. Рыженко Д.С., Юсова Ю.С. Исследование поля элементарного электрического диполя // Студенческая научно-техническая конференция «Студенческая научная весна – 2005»: Сборник трудов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – С. 70-71.