



Книги, публикуемые в серии «Мир радиозлектроники», содержат актуальную научную и технологическую информацию и, несомненно, будут полезны специалистам радиозлектронного комплекса при реализации государственной программы «Развитие электронной и радиозлектронной промышленности на 2013—2025 годы».

*Заместитель министра промышленности
и торговли Российской Федерации В. В. Шмак*



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Шпак Василий Викторович, заместитель министра промышленности и торговли РФ – председатель редсовета, к.э.н.

Члены совета:

Авдонин Борис Николаевич, советник директора ФГУП «ГосНИИАС», д.э.н., профессор, заслуженный экономист РФ, г. Москва

Акопян Иосиф Григорьевич, научный руководитель АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва

Анцев Георгий Владимирович, ген. директор – ген. конструктор АО «НПП «Радар ммс», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Беккиев Азрет Юсупович, первый заместитель ген. директора холдинговой компании «Росэлектроника», профессор, чл.-корр. РАН, г. Воронеж

Боев Сергей Федотович, генеральный директор ПАО МАК «Вымпел», лауреат Государственной премии, д.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Борисов Юрий Иванович, генеральный директор Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», д.т.н., г. Москва

Букашкин Сергей Анатольевич, АО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва

Бушуев Николай Александрович, советник ген. директора АО «НПП «Алмаз», к.ф.-м.н., д.э.н., профессор, г. Саратов

Верба Владимир Степанович, ген. конструктор АО «Концерн «Вега», профессор, чл.-корр. РАН, г. Москва

Верник Петр Аркадьевич, директор АНО «Институт стратегий развития», г. Москва

Вилкова Надежда Николаевна, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Гуляев Юрий Васильевич, научный руководитель ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, академик РАН, г. Москва

Зверев Андрей Владимирович, член правления ООО «СоюзМаш России», к.э.н., г. Москва

Козлов Геннадий Викторович, заместитель руководителя аппарата генерального директора-руководитель секретариата АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва

Красников Геннадий Яковлевич, ген. директор АО «НИИМЭ», президент РАН, академик РАН, г. Москва, г. Зеленоград

Критенко Михаил Иванович, руководитель проектов высшей категории радиоэлектронного комплекса госкорпорации «Ростех», к.т.н., г. Москва

Мальцев Петр Павлович, научный руководитель ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Попов Владимир Васильевич, президент ПАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, президент РТУ МИРЭА, г. Москва

Турилов Валерий Александрович, АО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга

Федоров Игорь Борисович, академик РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Хохлов Сергей Владимирович, ген. директор ФГУП «ГосНИИАС», г. Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, президент Национального исследовательского университета «МИЭТ», академик РАН, г. Москва, г. Зеленоград

Шахнович Илья Владимирович, главный конструктор ООО «НИИИТ», г. Москва

Шубарев Валерий Антонович, ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург

redsovet_knigi@electronics.ru



МИР радиоэлектроники

А.Н. Дементьев, А.О. Жуков,
В.К. Ильков, В.Р. Скрынский

Метаматериалы
в радиоэлектронике:
от исследований
к разработкам

Под ред. П.П. Мальцева

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2023

УДК 621.3

ББК 32.8

Д30

Д30 Дементьев А.Н., Жуков А.О., Ильков В.К., Скрынский В.Р.

Метаматериалы в радиоэлектронике: от исследований к разработкам

Под ред. П.П. Мальцева

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 248 с. ISBN 978-5-94836-674-6

В книге представлен обзор результатов разработок и исследований метаматериалов в радиоэлектронике, который сведен в следующие разделы: функциональные элементы СВЧ систем; метаматериалы в антенной технике; методы улучшения цифровой антенной решетки; разработка электрически малых антенн с применением метаматериала; дилемма «невидимости» и метаматериалы; радиопоглощающие системы на основе метаматериалов; инновационный стелс-метаматериал.

Обзор представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и магистров, студентов и бакалавров, специализирующихся в области радиоэлектроники и микросистемной техники.

УДК 621.3

ББК 32.8

© Дементьев А.Н., Жуков А.О., Ильков В.К., Скрынский В.Р., 2023

© Мальцев П.П., составление, 2023

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2023

ISBN 978-5-94836-674-6

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
ГЛАВА 1.	
ОБЗОР ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ	9
1.1. Общие принципы создания метаматериалов	9
1.2. Метаматериалы для СВЧ-систем.....	17
ГЛАВА 2.	
МЕТАМАТЕРИАЛЫ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ	23
2.1. Применение метаматериалов в антенной технике.....	23
2.2. Классификация метаматериалов	28
2.3. Метаматериалы в качестве подложек	37
ГЛАВА 3.	
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН	45
3.1. Общие принципы разработки ЭМА	45
3.2. Согласование ЭМА.....	52
3.3. Метаоболочка ЭМА.....	63
3.4. Сужение диаграммы излучения ЭМА.....	67
ГЛАВА 4.	
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В АНТЕННАХ	73
4.1. Направления использования метаматериалов в антеннах	73
4.2. Эффективность применения киральных метаматериалов в конструкции антенн	87
ГЛАВА 5.	
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВЧ-СИСТЕМ	92
Список источников	106
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение 1.	
1.1. Метод расчета микрополоскового вибратора, расположенного на киральной подложке.....	107
1.2. Исследование поляризационных и направленных характеристик микрополосковой антенны с подложкой из кирального метаматериала	117



- 1.3. Математическая модель двухэлементной микрорешетчатой излучающей структуры с подложкой из кирального метаматериала 126
- 1.4. Метод анализа конформных излучающих структур с киральным заполнением 138

Приложение 2.

- 2.1. Исследование полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров 145
- 2.2. Антенная система с коммутационным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга с концентрическими кольцами 153
- 2.3. Плоская линза Люнеберга на основе печатной схемы с проводниками криволинейной формы 167
- 2.4. Исследование многолучевых линзовых антенн на основе параллельных печатных плат 178

Приложение 3.

- 3.1. Модели и общие волновые свойства двумерных акустических метаматериалов и сред 187
- 3.2. Разработка виброударозащитных метаматериалов для снижения негативного воздействия на нефтегазовых объектах 206

Приложение 4.

- Металлические фотонные кристаллы 213

Приложение 5.

- Плазмонные метаповерхности 222

Приложение 6.

- Скрытность. Достижения 235

Предисловие

Одним из приоритетных направлений в науке сегодняшнего дня является создание искусственных материалов с необычными свойствами, которые не наблюдаются у природных материалов. Данные вещества получили название «метаматериалы».

Метаматериал – это искусственно сформированная и особым образом структурированная среда, обладающая электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе.

Измененная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемость исходного материала. Разработчик метаматериалов имеет возможность выбора различных свободных параметров (размеры структур, форма, постоянный и переменный период решетки элементов, образующих структуру).

Одно из возможных свойств метаматериалов – отрицательный коэффициент преломления n , который проявляется при одновременной отрицательности диэлектрической и магнитной проницаемости материала.

Основоположником создания метаматериалов является В.Г. Веселаго.

Применение метаматериалов – это новое и чрезвычайно перспективное направление развития радиоэлектроники. В области антенных систем поиск нетрадиционных подходов к созданию микроволновой техники в последнее время существенно активизировался.

Одно из новых направлений в развитии теории электрически малых антенн (ЭМА) связано с достижениями в области создания метаматериалов. В книге рассмотрены основные результаты в данной области применительно к задаче совершенствования техники ЭМА, но опущены подробное изложение физических основ и история этого вопроса.

Компоненты электромагнитных цепей, обладающие свойствами метаматериалов, находят применение в технике антенн в диапазоне достаточно высоких частот от 0,1 до 100 ГГц. Основные направления применения метаматериалов в технике антенн:

- излучатели, расположенные над высокоимпедансной поверхностью,
- антенны с излучающей поверхностной волной,
- уменьшение взаимного влияния элементов антенных решеток, в том числе в ММО-устройствах,
- увеличение коэффициента усиления рупорной антенны.

Метаматериал – это металл-диэлектрический гибридный рассеиватель, основанный на хорошо выраженном магнитном дипольном моменте с одновременно подавленным электрическим откликом, приводящим к минимизации полного рассеивания. Первым из возможных применений

нового покрытия станут стелс-технологии для военных и гражданских целей — для того, чтобы скрыть различные вытянутые объекты, такие как шасси самолетов, антенны и различные датчики, мачты кораблей и вышки аэропортов. Если задача скрыть эти предметы от радаров противника тривиальна, подчеркивают разработчики, то задача электромагнитной совместимости антенн на спутниках очень важна для того, чтобы антенны не влияли друг на друга. А это будет возможно только в случае, если они будут невидимы.

Метаматериал имеет искусственно созданную периодическую структуру. Применяв идею дипольных моментов, удалось разработать обобщенную теорему невидимости и превратить ее в математическую модель — образец сверхпроводящего метаматериала. Электрический момент, возбуждаемый в системе в момент попадания на нее сигнала радара, компенсируется тороидальным моментом. Анаполь (от греч. *an* — отрицат. частица и *polos* — полюс) представляет собой неизлучающий источник или рассеиватель, который способен излучать векторные потенциалы в отсутствие излученных электромагнитных полей, а также рассеивать векторные потенциалы в отсутствие полей.

Принципиально новым является вариант стелс-маскировки, которая позволит направленному на объект сигналу радара не отражаться, не поглощаться, а просто проходить насквозь, как будто никакого объекта нет. Такой метод маскировки основан не на создании маскирующего покрытия, а на изменении конфигурации всей системы объекта.

В каждом разделе книги приводятся описания метаматериалов с характерными вариантами названий параметров, используемых для данного направления. С одной стороны, это привело к некоторому повтору материала, но позволившему описать свойства метаматериалов в терминах, принятых в каждом направлении исследований, и дающему возможность изучить раздел книги без обращения к другим разделам или ссылок на них. Такой подход позволит читателям разных специальностей ознакомиться с результатами реализации метаматериалов в различных областях науки и техники.

В книге сохранена интерпретация различных авторов при описании необычных свойств метаматериалов, полученных математическим путем, и предложенные пути реализации этих свойств на физическом уровне в виде конкретных устройств. Сравнение различных подходов позволит читателю подобрать более близкое к восприятию описание использования метаматериалов.

Кроме того, в приложении приведены статьи авторов, имеющих опыт создания и реализации устройств радиоэлектроники с использованием метаматериалов, а также возможности применения метаматериалов в других областях — механике и оптике. В статьях также приведены методы расчета и разработки изделий.

ГЛАВА I

ОБЗОР ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

1.1. Общие принципы создания метаматериалов

Одним из приоритетных направлений в науке сегодняшнего дня является создание искусственных материалов с необычными свойствами, которые не наблюдаются у природных материалов. Данные вещества получили название «метаматериалы» [1].

Метаматериал – это искусственно сформированная и особым образом структурированная среда, обладающая электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе.

Измененная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемость исходного материала. Разработчик метаматериалов имеет возможность выбора различных свободных параметров (размеры структур, форма, постоянный и переменный период решетки элементов, образующих структуру).

Одно из возможных свойств метаматериалов – отрицательный коэффициент преломления n , который проявляется при одновременной отрицательности диэлектрической и магнитной проницаемости материала [2].

Оптические свойства вещества характеризуются коэффициентом преломления n , который связан с ε , μ простым соотношением:

$$n = \pm \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость.

Для вакуума $\varepsilon = \mu = 1$, а для остальных веществ, встречающихся в природе, $\varepsilon, \mu > 0$. Для всех известных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак «+» и поэтому показатель преломления положителен.

Если не учитывать потери в среде и считать, что и ε и μ – действительные величины, то из соотношения (1) видно, что одновременная смена знаков ε и μ не меняет физический смысл выражения.

Учитывая этот факт, можно высказать следующие предположения:

1. свойства веществ действительно не зависят от одновременной смены знаков ε и μ ;
2. одновременная смена знаков противоречит основным законам природы, и таких веществ в природе не должно быть;
3. вещества с $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$ имеют право на существование, и они должны обладать какими-то особыми свойствами.

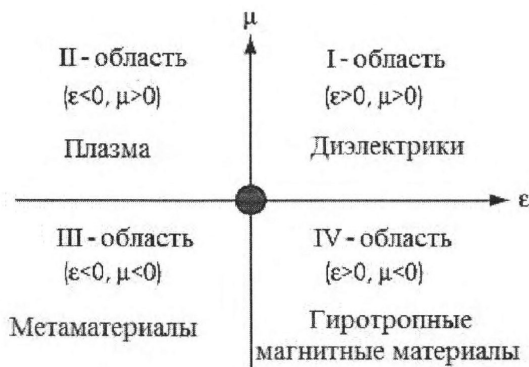


Рис. 1. Диаграмма ϵ – μ

Такие вещества были названы советским ученым В.Г. Веселаго в 1967 году «левыми». В своих работах В.Г. Веселаго описал многие необычные свойства «левых» веществ, в частности показал, что такие вещества должны обладать отрицательным показателем преломления, то есть для «левых» сред нужно брать знак «-».

Рассмотрим более детально типы метаматериалов и их структуру.

Анализ публикаций по различным аспектам технологий метаматериалов позволяет классифицировать все многообразие естественных и искусственных сред в зависимости от эффективных значений их диэлектрической и магнитной проницаемости (рис. 1).

Как описывалось ранее, у почти всех встречающихся в природе веществ диэлектрическая и магнитная проницаемость $\epsilon, \mu > 0$. Также у подавляющего большинства сред в наиболее интересных для практического использования диапазонах частот в области микроэлектроники и метрологии эти параметры, как правило, $\epsilon, \mu > 1$. Рассмотрим каждую из областей диаграммы ϵ – μ более детально.

I-область

В зарубежной литературе данные материалы обычно называют «двойные положительные», подчеркивая тем самым положительность значений как ϵ , так и μ . Среды области I считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы. Область I – большинство изотропных диэлектриков.

II-область

Наиболее известным примером естественной среды II-области, которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты возбуждения ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (2)$$

где ω_p – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой.

Плазменная частота зависит от плотности, величины заряда и массы носителей зарядов. Ниже плазменной частоты диэлектрическая проницаемость отрицательна и электромагнитные волны не могут распространяться из-за потери среды прозрачности. При $\omega > \omega_p$ величина $\varepsilon > 0$ и электромагнитные волны могут проходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера Земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при $\varepsilon(\omega) > 0$), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением.

На рис. 2 представлен пример метаматериала II-области, представляющий систему из тонких расположенных параллельно металлических проводников.

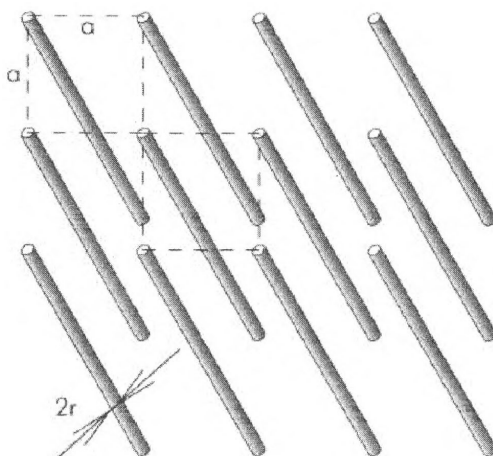


Рис. 2. Метаматериал области II в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик

IV-область

Средами с положительной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостью являются в определенных частотных режимах некоторые гиротропные вещества. Простейшим элементом, позволяющим создать искусственную среду IV-типа, является кольцевой разомкнутый резонатор, представленный на рис. 3.

В этой структуре емкость между двумя кольцами компенсируется их индуктивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает потоки, которые в зависимости от резонансных свойств структуры порождают вторичное магнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему, что приводит к поло-

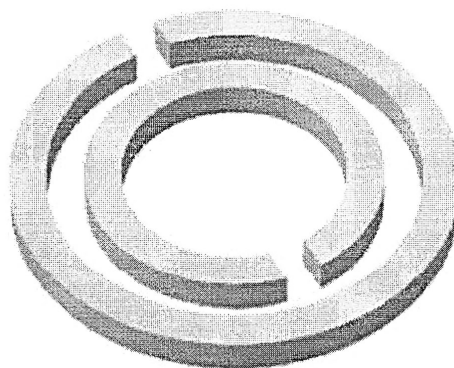


Рис. 3. Кольцевой разомкнутый резонатор

жительным или отрицательным эффективным значениям ζ . Магнитная проницаемость метаматериала, созданного с применением таких структур, описывается формулой

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F \cdot \omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i \cdot \omega \cdot \zeta}, \quad (3)$$

где ω_{0m} — резонансная частота кольцевого резонатора; ζ — параметр затухания.

Как видно из формулы (3), на частотах выше резонансной эффективная магнитная проницаемость такого метаматериала отрицательна.

III-область

Вещества, у которых $\epsilon, \mu < 0$, относят к области III диаграммы, изображенной на рис. 1. К таким веществам относятся, например, чистые ферромагнитные металлы и полупроводники. В них при распространении определенного типа волн вдоль направления приложенного внешнего магнитного поля эффективные электрическая и магнитная проницаемости могут одновременно принимать отрицательные значения.

Применение этих структур для получения метаматериалов, обладающих отрицательными эффективными значениями диэлектрической и магнитной составляющей, впервые предложил Джон Пендри в 1999 году.

Его подход заключался в том, что если композитный материал состоит из дискретных рассеивающих элементов, размер которых меньше длины волны излучения, то данный композит с точки зрения электродинамики можно рассматривать как непрерывный в ограниченной полосе частот. Другими словами, физическая среда будет непрерывной в электромагнитном смысле, если ее свойства могут быть описаны усредненными параметрами, изменяющимися в масштабе, намного большем, чем размеры и интервал образующих материал компонентов.

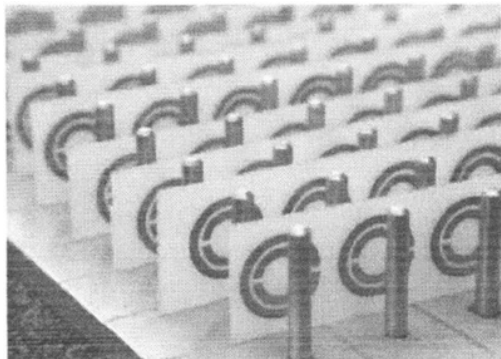


Рис. 4. Комбинация структур с отрицательной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостью

Таким образом, был впервые получен материал, обладающий одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостью. До недавнего времени этот класс материалов был представлен только искусственными конструкциями, однако в 2006 году было установлено, что кристаллы $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$ обладают такими же свойствами в диапазоне 150 ГГц.

Материалы III-типа обладают рядом интересных свойств, наиболее примечательным из которых является отрицательный коэффициент преломления электромагнитных волн n . Результаты прямого измерения угла преломления для призмы, изготовленной на основе метаматериала, приведенного на рис. 4, убедительно показали, что преломление электромагнитной волны на границе вакуума и такой композитной среды имеет отрицательное значение n .

Отрицательная величина коэффициента преломления изменяет геометрическую оптику линз и других объектов, образованных из материалов III-типа. Например, фокусирующая линза становится рассеивающей. Напротив, отклоняющая двояковогнутая линза, изготовленная из материала, действует как фокусирующая. Кроме того, обычная плоскопараллельная пластина с $n = -1$ может выступать в роли собирающей линзы.

Поскольку метаматериалы являются структурами с уникальными электромагнитными свойствами, они находят широкое применение при разработке и производстве различных сверхвысокочастотных устройств. На их основе строят резонаторы, фазовращатели, различного вида фильтры.

Компоненты электромагнитных цепей, обладающие свойствами метаматериалов, применяются также в технике антенн в диапазоне частот от 100 МГц до 100 ГГц.

Основными направлениями использования метаматериалов при этом являются:

- излучатели, расположенные над высокоимпедансной поверхностью;
- антенны с излучающей поверхностной волной;
- уменьшение взаимного влияния элементов антенных решеток, в том числе в ММО-устройствах;
- увеличение коэффициента усиления рупорной антенны.

Для вывода основных соотношений, описывающих распространение волн в среде, необходимо использовать уравнения Максвелла и соотношения, характеризующие свойства среды:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H, \quad (4)$$

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E, \quad (5)$$

где B , H – вектора индукции и напряженности магнитного поля; D , E – вектора индукции и напряженности электрического поля; ε , μ – электрическая и магнитная постоянные.

Представим электрическую и магнитную проницаемость среды в виде

$$\varepsilon = p \cdot |\varepsilon|, \quad \mu = p \cdot |\mu|. \quad (6)$$



Рис. 5. Направление векторов k , E , H и S , где a – для «правой» среды; b – для «левой» среды.

Предположим, что в среде в направлении оси z распространяется плоская монохроматическая волна, у которой все величины изменяются по закону $\exp(i(\omega t - kz))$. Используя уравнения Максвелла и приведенные выше соотношения, для такой волны можно получить следующие выражения, описывающие связь между E , H и волновым вектором k :

$$[k \cdot E] = \omega \cdot \mu_0 \cdot p \cdot |\mu| \cdot H, \quad [k \cdot H] = -\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot p \cdot |\varepsilon| \cdot E. \quad (7)$$

На рис. 5 представлено расположение векторов k , E и H .

Поток энергии, переносимый электромагнитной волной, определяется вектором Умова – Пойнтинга S , который записывается как

$$S = [E \cdot H] = \omega \cdot V_{gp}, \quad (8)$$

где ω – плотность энергии электромагнитной волны; V_{gp} – групповая скорость, то есть скорость переноса энергии.

Таким образом, волна, распространяясь в среде, имеет две скорости – фазовую V_ϕ и групповую V_{gp} . Фазовая скорость – это скорость движения фазы волны, например максимума или минимума колебательного процесса, а групповая скорость – это скорость, с которой движется огибающая

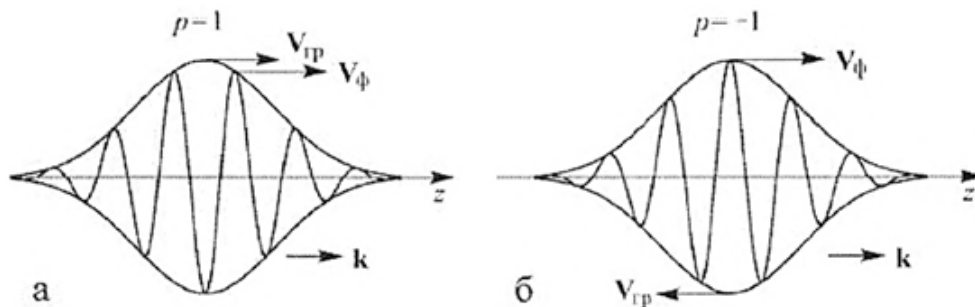


Рис. 6. Импульс электромагнитной волны, распространяющийся в направлении z , где a – в «правой» среде; b – в «левой» среде

импульса. Они не обязательно должны быть одинаковы и направлены в одну сторону.

Из соотношения видно, что вектор S , а следовательно, и V_{gp} всегда образуют с векторами E и H правую тройку векторов. Таким образом, для «правых» сред фазовая и групповая скорости всегда направлены в одну сторону (рис. 6, *a*), а для «левых» сред вектора V_{gp} и $V_{ф}$ — в разные стороны (рис. 6, *б*), то есть это среды с отрицательной групповой скоростью.

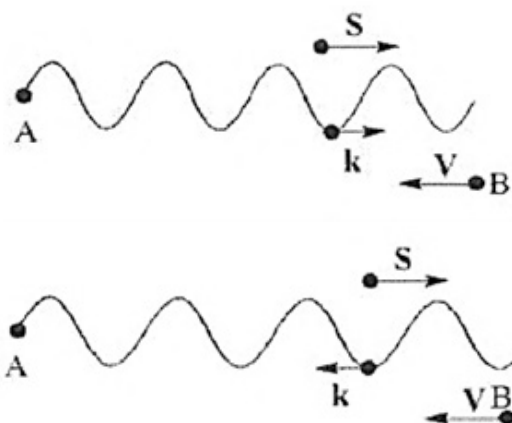


Рис. 7. Эффект Доплера, где *a* — для «правой» среды ($p = +1$); *б* — для «левой» среды ($p = -1$)

Рассмотрим следующие эффекты, возникающие в «правых» и «левых» средах:

- 1) обращенный эффект Доплера;
- 2) световое притяжение;
- 3) преломление луча на границе с левой средой.

Обращенный эффект Доплера

Изменение частоты колебаний вследствие движения источника или приемника называется эффектом Доплера. Пусть приемник излучения В движется со скоростью V относительно излучателя А, который излучает частоту, как показано на рис. 7. В этом случае для частоты, воспринимаемой приемником вследствие доплеровского сдвига, можно записать выражение

$$\omega = \omega_0 \left(1 + p \frac{V}{V_{gp}} \right). \quad (9)$$

В «левой» среде ($p = -1$) приемник будет догонять точки волны, соответствующие какой-либо определенной фазе (рис. 7, *б*). При этом в формуле (9) скорости V и V_{gp} направлены в разные стороны. Поэтому в «правой» среде удаляющийся от нас объект кажется более красным из-за эффекта Доплера, а в «левой» среде будет казаться более синим.

Световое притяжение

Монохроматическую волну в «левой» среде можно рассматривать как поток фотонов, каждый из которых обладает импульсом $p = \hbar k$, где k —

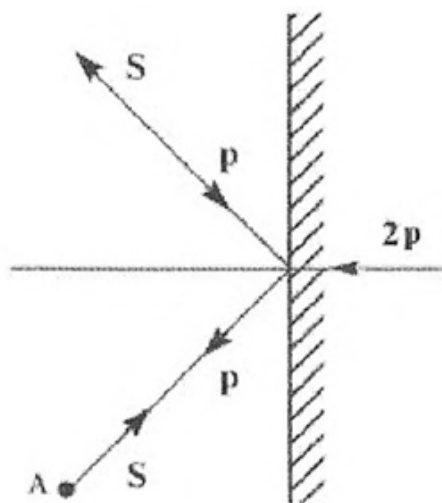


Рис. 8. Отражение луча, распространяющегося в «левой» среде

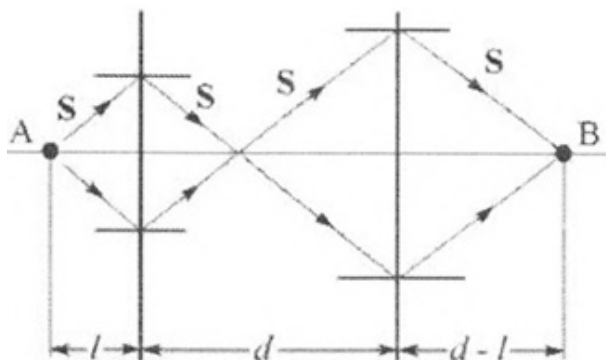


Рис. 9. Прохождение луча света через пластину из «левого» вещества, где А – источник излучения; В – приемник излучения

А, находящегося на расстоянии $l < d$ от пластины. Главное свойство – у нее отсутствует фокальная плоскость. Это означает, что линза создает объемное изображение предмета, что делает ее похожей на зеркало. Но, в отличие от зеркала, создаваемое изображение действительное, что открывает новые возможности для цветной фотографии. Плоскопараллельная пластинка с $\epsilon = \mu = -1$ является «идеальной» линзой, поскольку она имеет нулевой коэффициент отражения и создается идеальное изображение, так как набег фазы по любым траекториям между объектом и изображением равен нулю.

волновой вектор, причем вектор k направлен к источнику излучения А, а не от него, как это имеет место в «правой» среде (рис. 8).

Поэтому луч света, распространяющийся в «левой» среде, при падении на идеально отражающую поверхность будет передавать ей импульс $p = 2Nhk$ ($N \sim$ число падающих фотонов), направленный к источнику, как показано на рис. 8. Следовательно, световое давление, характерное для обычных сред, в «левой» среде заменяется световым притяжением.

Преломление луча на границе с левой средой

Использование «левых» сред позволяет создать необычные преломляющие системы. Примером является простая пластинка толщиной d из «левого» вещества с $n < 0$, находящаяся в воздухе (рис. 9).

Такая пластинка может фокусировать в точку В излучение точечного источника

1.2. Метаматериалы для СВЧ-систем

Одно из направлений развития современной оптики, радиофизики и физики твердого тела – параллельное исследование природных кристаллов и разработка с учетом их свойств новых типов искусственных сред, которые названы метаматериалами, поскольку обладают особыми свойствами, которые невозможно получить, используя природные вещества. Греческое «*мета*» означает «вне», «за пределами», что подчеркивает непринадлежность метаматериалов к естественным объектам. Среди исключительных особенностей метаматериалов принято рассматривать отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемости, существующие одновременно, отрицательный показатель преломления, сильные киральные свойства и др. Можно исследовать метаматериалы как системы, состоящие из микрорезонаторов или «метаатомов», обладающие желательными и управляемыми свойствами в оптическом, СВЧ- и терагерцевом диапазонах. В последние несколько лет повышенное внимание уделяется особо тонким метаматериалам, или метаповерхностям, в которых необходимые характеристики могут быть достигнуты при использовании только одного слоя искусственных частиц (метаатомов), что повышает их эффективность [3].

Изучение метаматериалов и метаповерхностей не только вызывает интерес с фундаментальной точки зрения, но и открывает широкие прикладные возможности по созданию приборов для управления электромагнитным полем, включая новые типы электромагнитных сенсоров, компактные антенны, линзы с субволновым разрешением, объекты, скрытые в определенном диапазоне частот, неотражающие поглотители, поляризаторы волн и др.

Для исследования распространения монохроматических волн в метаматериалах с учетом возможных магнитоэлектрических эффектов следует использовать уравнения связи:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} + i \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} k \vec{H}, \\ \vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H} - i \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} k^T \vec{E},\end{aligned}\tag{10}$$

где \vec{D} , \vec{B} и \vec{E} , \vec{H} – соответственно векторы индукции и напряженности электрического и магнитного полей; ε_r , μ_r – тензоры относительной диэлектрической и магнитной проницаемости; k – тензор, характеризующий магнитоэлектрические, в том числе киральные, свойства среды; индекс T – операция транспонирования; ε_0 , μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; i – мнимая единица.

Материальные уравнения в такой форме представлены для природных кристаллов для биизотропных сред.

Уравнения связи в силу своей общности позволяют учесть диэлектрические, магнитные и магнитоэлектрические свойства природного

кристалла или метаматериала, существующие одновременно в одном объекте. Следует отметить, что у природных кристаллов чаще проявляются либо диэлектрические свойства, либо магнитные, тогда соответствующий тензор проницаемости значительно отличается от единичного значения. Что касается магнитоэлектрических свойств, в том числе киральных, то в оптическом диапазоне частот для природных кристаллов они обычно слабые. Значения тензора k пропорциональны отношению α/λ , где α – линейный размер молекулы, λ – длина волны излучения. В оптике природных сред параметр α/λ имеет порядок $10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Качественно другая картина может наблюдаться в отношении метаматериалов и метаповерхностей, у которых магнитоэлектрическим параметром k можно управлять, увеличивая отношение α/λ при их конструировании. Этот параметр может существенно возрасти, особенно в частотной области проявления резонансных свойств метаатомов, например в условиях резонанса электрического тока вдоль проводящего элемента метаматериала. При этом резонанс может быть достигнут, если линейные размеры элемента метаматериала малы по сравнению с длиной волны излучения, а длина проводника, из которого он изготовлен, приблизительно равна половине длины волны. В этом случае магнитоэлектрические свойства метаматериала такие же значимые, как и его диэлектрические и магнитные, которые, в свою очередь, также усиливаются вследствие резонансного возрастания колебаний электрического тока в метаатоме. В результате свойства метаматериала, который в определенном смысле подобен природным кристаллам и имитирует их строение, могут кардинально отличаться от таковых у естественных кристаллов. При специальной форме частиц метаматериала, которую принято называть сбалансированной или оптимальной, возможно выполнение соотношения

$$\varepsilon_r = \mu_r = 1 \pm k. \quad (11)$$

Эта формула показывает, что метаматериал имеет одинаково значимые диэлектрические, магнитные и киральные свойства, что невозможно для природных кристаллов. Знак «плюс» выбирается, если магнитоэлектрический параметр k положительный, а знак «минус» – если он отрицательный. Чтобы соотношение (11) выполнялось, необходима, как было указано, сбалансированная форма частиц метаматериала, для которых должно быть справедливым выражение для электрического дипольного момента p и магнитного момента m :

$$|\vec{p}| = \frac{|\vec{m}|}{c}, \quad (12)$$

где c – скорость света в вакууме.

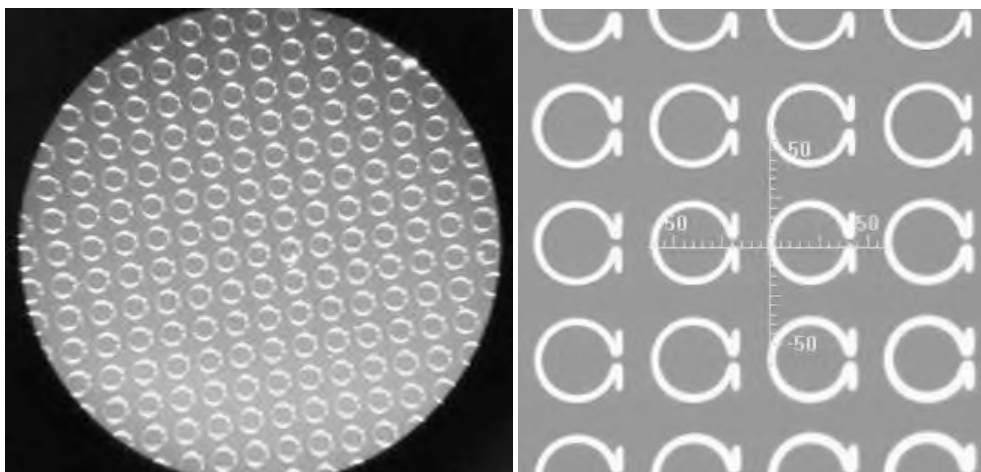


Рис. 10, а. Метаповерхность, образованная омега-элементами на кремниевой подложке. Метаматериал изготовлен на предприятии «ИНТЕГРАЛ»

Один из возможных метаатомов — омега-элемент, то есть проводящая частица в виде греческой буквы «омега». Под действием электромагнитной волны в каждой такой частице может создаваться электрический дипольный момент, направленный вдоль плеч омега-элемента, поскольку электрические заряды сосредоточены в основном на его концах. Одновременно в каждом метаатоме может возникать магнитный момент, ориентированный перпендикулярно плоскости омега-элемента, так как в его петле электрический ток преимущественно и существует (рис. 10, а).

Кроме того, омега-частица демонстрирует магнитоэлектрические свойства, поскольку в ней возможны так называемые перекрестные эффекты: электрическое поле может создавать магнитный момент, а магнитное поле, в свою очередь, — электрический дипольный момент. В то же время омега-элемент не является киральной частицей, поскольку это плоская фигура, а термин «киральный» применяют только к трехмерным объектам. На основе омега-элементов с заранее рассчитанными параметрами реально создать метаматериал с одинаково значимыми диэлектрическими, магнитными и магнитоэлектрическими свойствами. Его можно применять для преобразования поляризации электромагнитной волны и получения отраженной циркулярно-поляризованной волны при падении линейно-поляризованной в терагерцевом диапазоне частот.

В качестве элементов метаматериалов могут быть использованы также омега-частицы прямоугольной формы, в этом случае можно упростить некоторые этапы изготовления образцов и расширить технологические возможности (рис. 10, б).

Перспективные элементы метаматериалов — проводящие спирали цилиндрической формы. Как и в омега-атоме, в спирали одновременно могут возникать электрический дипольный и магнитный моменты под

действием электромагнитной волны, а также перекрестные, или магнито-электрические эффекты. Однако спираль – киральная частица, поскольку является 3D-объектом и отличается от своего зеркального изображения. Если предварительно рассчитать ее оптимальные характеристики, то на их основе можно создать метаматериалы с одинаково сильно выраженными диэлектрическими, магнитными и киральными свойствами, которые не наблюдаются у естественных кристаллов.

Поскольку расстояние между спиралями значительно меньше длины волны, то по отношению к электромагнитному полю образец следует рассматривать как массив, а не как дифракционную решетку, что характерно для метаматериалов. В качестве подложки для спиралей можно использовать пенопласт, который прозрачен для СВЧ-волн и не нарушает баланс диэлектрических и магнитных свойств метаматериала (рис. 11).

Особый интерес вызывают метаматериалы, поглощающие СВЧ-волны в резонансной области частот и при этом имеющие очень малый коэффициент их отражения в очень широком частотном диапазоне.

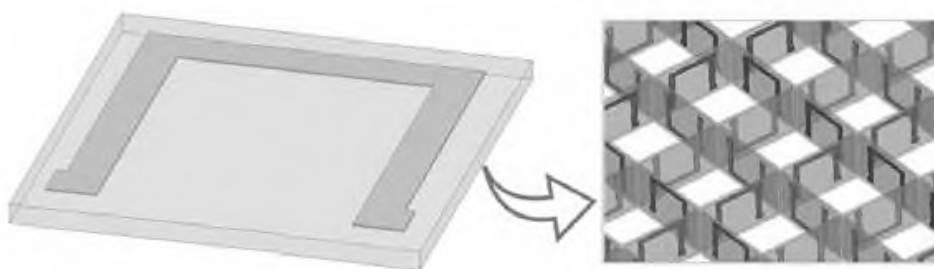


Рис. 10, б. Схема конструирования трехмерного образца метаматериала из плоских омега-резонаторов прямоугольной формы на подложке

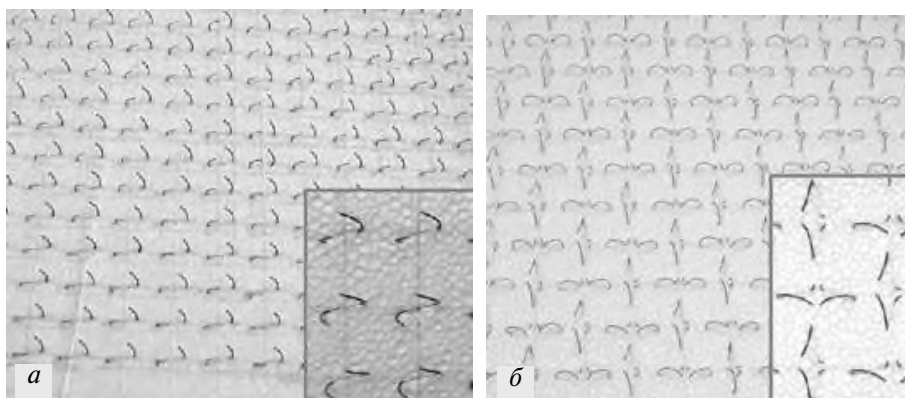


Рис. 11. Экспериментальные образцы метаматериалов для СВЧ-диапазона, состоящие из спиральных элементов: *а* – фото образца метаматериала для преобразования поляризации СВЧ-волны при ее отражении, *б* – метаматериал, поглощающий СВЧ-волны, но не отражающий их

Их киральные свойства скомпенсированы, поскольку в структуре имеется равное число право- и левозакрученных спиралей. Слабые отражающие качества таких метаматериалов обусловлены равенством их относительной диэлектрической и относительной магнитной проницаемости. В результате волновой импеданс образца η равен импедансу свободного пространства η_0 :

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \eta_0, \quad (13)$$

что приводит к нулевому коэффициенту отражения. Чтобы подчеркнуть особые характеристики метаматериалов, отметим, что природные кристаллы обладают либо диэлектрическими, либо магнитными свойствами (например магнитоупорядоченные кристаллы). Поэтому в оптике согласно формулам Френеля коэффициент отражения света определяется показателем преломления вещества, точнее его отличием от единичного значения, соответствующего вакууму.

Метаматериалы для СВЧ-волн часто изготавливают вручную, поскольку длина их элементов в выпрямленном состоянии приблизительно равна половине длины волны (несколько сантиметров). Эти метаматериалы – хорошая модель для более миниатюрных образцов, предназначенных для терагерцевого и оптического диапазонов и требующих сложных и дорогостоящих технологий изготовления. Метод электродинамического подобия позволяет масштабировать параметры метаатомов, полученные для СВЧ-волн, и приблизительно определять оптимальную геометрию элементов метаматериала для гораздо более высоких частот. Точные размеры метаатомов для терагерцевого и оптического диапазонов можно найти путем численного моделирования.

Экспериментально реализовать метаматериалы на основе оптимальных спиралей для терагерцевого диапазона для СВЧ-волн оказалось возможным с использованием метода точного 3D-наноструктурирования (рис. 12).

Полученный метаматериал проявляет одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства, которые обусловлены оптимальной формой имеющихся в его основе спиралей. В то же время киральные характеристики искусственной структуры скомпенсированы, поскольку используются парные оптимальные спирали с правым и левым направлением закручивания. В результате созданный метаматериал обладает в терагерцевом диапазоне волновым импедансом, близким к импедансу свободного пространства.

Таким образом, создан метаматериал, поглощающий терагерцевые волны вблизи резонансной частоты и одновременно имеющий низкий коэффициент отражения. В дальнейшем он может найти интересные области приложения, в том числе при производстве каскадных устройств, в которых требуется совместимость элементов, их независи-

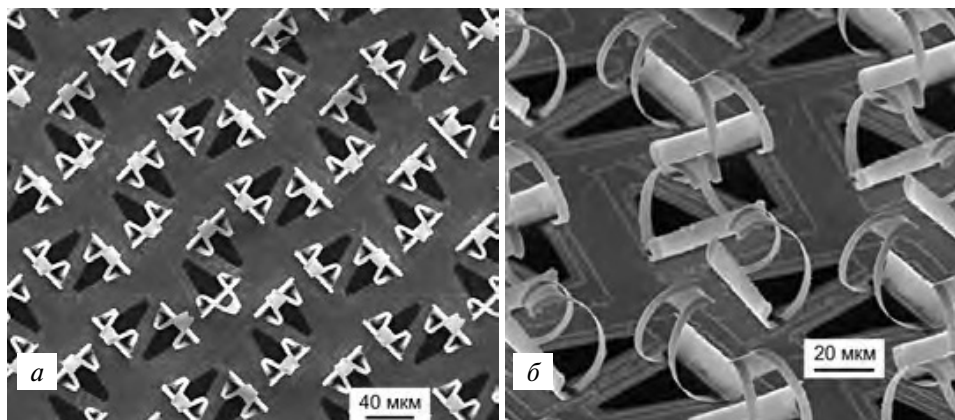


Рис. 12. СЭМ-изображение метаматериала, образованного одновитковыми сбалансированными спиралями на основе пленки из $/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$: *a* – вид сверху, *б* – вид под углом

ное функционирование на различных частотах и отсутствие взаимных помех.

Электродинамика метаматериалов – динамично развивающаяся область современной физики, что подтверждает большое число публикаций в этой сфере.

ГЛАВА 2

МЕТАМАТЕРИАЛЫ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ

2.1. Применение метаматериалов в антенной технике

Массовое распространение и взрывная эволюция мобильных устройств в последнее десятилетие ставят перед инженерами и учеными все новые задачи по повышению энергоэффективности и одновременному уменьшению массы и габаритов используемых радиоэлектронных компонентов. Не в последнюю очередь это относится к антенным системам, к которым в современных устройствах предъявляются все более жесткие требования по таким параметрам, как эффективность, широкополосность, надежность и функциональность. Удовлетворение этим требованиям невозможно без реализации новых физических явлений, разработки новых материалов и технологий. В последние годы разработчиков СВЧ-устройств и антенн все больше привлекают новые материалы и среды с необычными электродинамическими свойствами, и прежде всего метаматериалы [4].

Метаматериал – композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой. Искусственная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемость исходного материала.

Таким образом, метаматериалы представляют собой искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе. Приставка «мета-» переводится с греческого как «вне», что позволяет трактовать термин «метаматериалы» как структуры, чьи эффективные электромагнитные свойства выходят за пределы свойств образующих их компонентов.

Анализ публикаций по различным аспектам технологий метаматериалов позволяет классифицировать все многообразие естественных и искусственных сред в зависимости от эффективных значений их диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости (рис. 13). У почти всех встречающихся в природе веществ диэлектрическая и магнитная проницаемости больше нуля. Существенно, что у подавляющего большинства

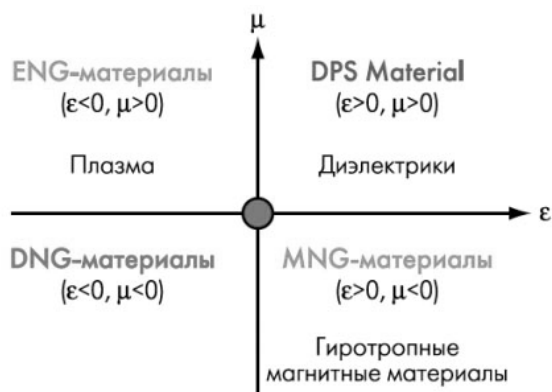


Рис. 13. Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости

сред в наиболее интересных для практического использования диапазонах частот эти параметры, как правило, вообще больше или равны единице. В зарубежной литературе данные материалы обычно называют DPS (*double positive*, двойные положительные), подчеркивая тем самым положительность значений как ϵ , так и μ (правый верхний квадрант на рис. 13). DPS-среды считаются прозрач-

ными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы.

Материалы, у которых отрицательна ϵ либо μ , называют SNG (*single negative*, моноотрицательные). В таких средах электромагнитные волны быстро затухают по экспоненте. В отношении подобных материалов полагают, что они непрозрачны для излучения, если их толщина больше, чем характерная экспоненциальная длина затухания электромагнитных волн. Если $\epsilon < 0$ и $\mu > 0$, SNG-материал называют ENG (ϵ – отрицательный), если $\epsilon > 0$ и $\mu < 0$ – MNG (μ – отрицательный).

Наиболее известным примером естественной ENG-среды, которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты возбуждения ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (14)$$

где ω_p – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой (радиальной частотой собственных колебаний плазмы) и зависящий от плотности, величины заряда и массы носителей зарядов. Ниже плазменной частоты диэлектрическая проницаемость отрицательна и электромагнитные волны не могут распространяться из-за потери средой прозрачности. При $\omega > \omega_p$ величина $\epsilon > 0$, и электромагнитные волны могут проходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера Земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при $\epsilon(\omega) < 0$), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением. В качестве примера метаматериала, представляющего собой искусственную ENG-среду, можно привести систему из тонких расположенных параллельно металлических проводников (рис. 14).

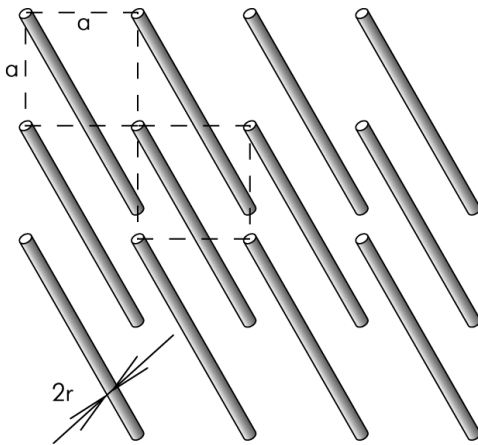


Рис. 14. Метаматериал ENG-типа в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик

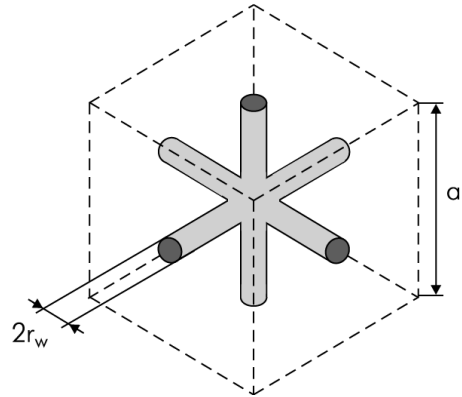


Рис. 15. Триpletный элемент для создания изотропных ENG-структур

Если электрическое поле параллельно осям проводников, то в них возбуждается ток, создающий эквивалентные электрические дипольные моменты. Усреднение дипольных моментов образует диэлектрическую проницаемость структуры с частотной зависимостью плазменного типа:

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\omega\xi}, \quad (15)$$

где ω_{pe} – частота электронной плазмы, ξ – параметр затухания:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{2\pi c^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)}}, \quad (16)$$

$$\xi = \frac{2\omega_{pe}^2 \varepsilon_0}{\pi \sigma} \left(\frac{a}{r}\right)^2.$$

Здесь a – расстояние между проводниками, r – радиус проводника, c – скорость света, σ – удельная электропроводность материала проводника. Для достижения независимости избирательных свойств метасреды от направления электромагнитных волн следует использовать трехмерные формы структурообразующих элементов. Обобщением проводных решетчатых на изотропный вариант ENG-материалов является триpletная конструкция (рис. 15).

Средами с положительной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостью в определенных частотных режимах являются некоторые гиротропные вещества. Простейшим элементом, позволяющим создать искусственную MNG-среду (метаматериал), является коль-



Рис. 16. Кольцевой разомкнутый резонатор (KPP, англ. *Split ring resonator*, SRR) (рис. 16). В этой структуре емкость между двумя кольцами компенсируется их индуктивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает потоки, которые в зависимости от резонансных свойств структуры порождают вторичное магнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему, что приводит к положительным или отрицательным эффективным значениям μ . Магнитная проницаемость метаматериала, созданного с применением таких структур, описывается формулой

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i\omega\xi}, \quad (17)$$

где ω_{0m} – резонансная частота кольцевого резонатора, ξ – параметр затухания:

$$\omega_{0m} = c \sqrt{\frac{3p}{\pi \ln(2\omega a^3 / \delta)}}, \quad (18)$$

$$F = \pi \left(\frac{a}{p} \right)^2, \quad (19)$$

$$\xi = \frac{2pR_1}{a\mu_0}. \quad (20)$$

Здесь a – внутренний радиус меньшего кольца, δ – радиальное расстояние между кольцами, p – расстояние между центрами соседних KPP, R_1 – погонное сопротивление металлического проводника. Как видно из формулы, на частотах выше резонансной эффективная магнитная проницаемость такого метаматериала отрицательна.

Был впервые получен материал, обладающий одновременно отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью (DNG-материал). До недавнего времени этот класс материалов был представлен только искусственными конструкциями, однако было установлено, что кристаллы $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$ обладают такими же свойствами в диапазоне 150 ГГц.

DNG-материалы обладают рядом интересных свойств, наиболее примечательным из которых является отрицательный коэффициент преломления электромагнитных волн n .

Кроме этого, в DNG-среде векторы Умова – Пойнтинга и фазовой скорости (волновой вектор k) противоположны, соответственно \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{k} формируют левостороннюю систему координат (в отличие от DPS-среды, в которой они формируют правостороннюю систему). Из-за этого DNG-среды также называют LHM (*left-hand materials*, левосторонние материалы).

Отрицательная величина коэффициента преломления изменяет геометрическую оптику линз и других объектов, образованных из DNG-материалов. Например, фокусирующая линза становится рассеивающей. Напротив, отклоняющая двояковогнутая линза, изготовленная из DNG-материала, действует как фокусирующая. Кроме того, обычная плоскопараллельная пластина с $n = -1$ может выступать в роли собирающей линзы. Поскольку метаматериалы являются структурами с уникальными электромагнитными свойствами, они находят широкое применение при разработке и производстве различных СВЧ-устройств. На их основе строят резонаторы, фазовращатели, фильтры и т. п. Компоненты электромагнитных цепей, обладающие свойствами метаматериалов, применяются также в технике антенн в диапазоне частот от 100 МГц до 100 ГГц. Основными направлениями использования метаматериалов при этом являются:

- излучатели, расположенные над высокоимпедансной поверхностью;
- антенны с излучающей поверхностной волной;
- уменьшение взаимного влияния элементов антенных решеток, в том числе в ММО-устройствах;
- увеличение коэффициента усиления рупорной антенны.

Использование метаматериалов является одним из наиболее перспективных и динамических развивающихся направлений в СВЧ-технике. Потенциал, заложенный в нем, еще только предстоит полностью раскрыть, но уже сейчас применение искусственных структур с необычными электродинамическими свойствами позволяет создать СВЧ-устройства и антенны, характеристики которых недостижимы другими способами.

Применение метаматериалов – это новое и чрезвычайно перспективное направление развития радиотехники, в первую очередь затрагивающее область антенных систем. Технология микрополосковых антенн, которая была столь многообещающей около двух десятилетий назад, ныне достигла своих пределов относительно сокращения габаритов СВЧ-устройств. Поэтому поиск нетрадиционных подходов к созданию микроволновой техники в последнее время существенно активизировался, о чем свидетельствует серия публикаций В. Слюсара по технологиям

электрически малых антенн (ЭМА) [5, 6]. Одно из новых направлений в развитии теории ЭМА связано с достижениями в области создания метаматериалов. Рассмотрим основные результаты в данной области применительно к задаче совершенствования техники ЭМА.

2.2. Классификация метаматериалов

Метаматериалы – это искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе [5]. Первые работы в этом направлении относятся еще к XIX веку. В 1898 году Джагадис Чандра Бозе провел первый микроволновый эксперимент по исследованию поляризационных свойств созданных им структур искривленной конфигурации. В 1914 году Линдман воздействовал на искусственные среды, представлявшие собой множество беспорядочно ориентированных маленьких проводов, скрученных в спираль и вложенных в фиксирующую их среду.

В 1946–1948 годах Уинстон Е. Кок впервые создал микроволновые линзы, используя проводящие сферы, диски и периодически расположенные металлические полоски, фактически образовавшие искусственную среду со специфичным по величине эффективным индексом преломления. С тех пор сложные искусственные материалы стали предметом изучения для многих исследователей во всем мире. В последние годы новые понятия и концепции в синтезе метаматериалов способствовали созданию структур, имитирующих электромагнитные свойства известных веществ или обладающих качественно новыми

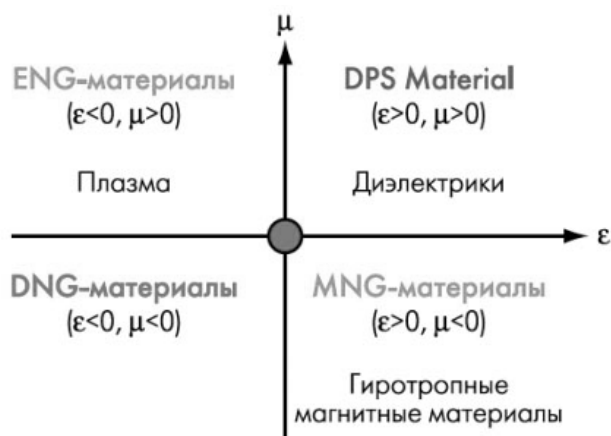


Рис. 17. Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости

функциями.

Все многообразие естественных и искусственных сред можно классифицировать в зависимости от эффективных значений их диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости (рис. 17). У почти всех встречающихся в природе веществ диэлектрическая и магнитная проницаемость больше нуля. Существенно, что у подавляющего боль-

шинства сред в наиболее интересных для практического использования диапазонах частот эти параметры, как правило, вообще больше или равны единице. В зарубежной литературе данные материалы обычно называют DPS (*double positive*, дважды позитивные), подчеркивая тем самым положительность значений как ϵ , так и μ (правый верхний квадрант на рис. 17). DPS-среды считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы.

Материалы, у которых отрицательна ϵ либо μ , на принятом за рубежом научном сленге называют SNG (*single negative*, мононегативные). В таких средах электромагнитные волны быстро затухают по экспоненте. В отношении подобных материалов полагают, что они непрозрачны для излучения, если их толщина больше, чем характерная экспоненциальная длина затухания электромагнитных волн. Если $\epsilon < 0$, SNG-материал называют ENG (ϵ -негативные), если $\epsilon > 0$ и $\mu < 0$ – MNG (μ -негативные).

По степени преломления

1. Одномерные метаматериалы состоят из слоев элементов, которые расположены параллельно и имеют разные степени преломления. В них волна распространяется лишь в одном направлении.

2. Двумерные метаматериалы – это метаповерхности. В них распространение волны может происходить в двух направлениях.

3. Трехмерные метаповерхности-метаструктуры представляют из себя объемную структуру (шар, куб и т.д.), расположенную в трехмерном пространстве. Степень преломления в них постоянно меняется в трех направлениях.

ϵ -негативные материалы

Наиболее известным примером естественной ENG-среды, которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты возбуждения ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (21)$$

где ω_p – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой (радиальная частота собственных колебаний плазмы) и зависящий от плотности, величины заряда и массы носителей зарядов. Ниже плазменной частоты диэлектрическая проницаемость отрицательна и электромагнитные волны не могут распространяться из-за потери средой прозрачности. При $\omega > \omega_p$ величина $\epsilon > 0$ и электромагнитные волны могут про-

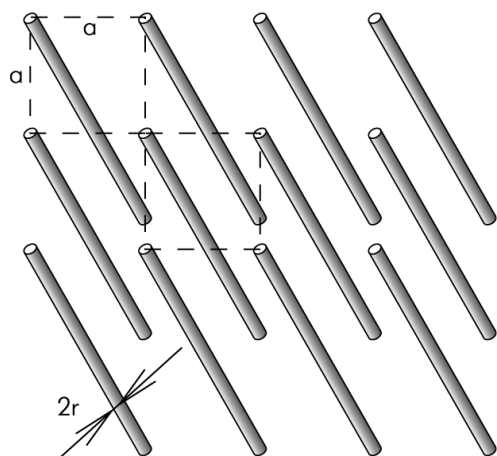


Рис. 18. Метаматериал ENG-типа в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик

шлось в работе Джона Брауна еще в 1953 году. Он получил соотношение для плазменной частоты данного метаматериала:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{2\pi r}\right)}, \quad (22)$$

где c_0 – скорость света, a – интервал между проводниками (см. рис. 18), r – радиус проводника. Позднее оно было подтверждено Уолтером Ротманом, который в 1961 году продемонстрировал возможность использования множества тонких проводников для моделирования плазмы, поскольку их эффективная диэлектрическая проницаемость выражается той же самой формулой (15). В частности, для метаструктуры на основе алюминиевых проводников с радиусом $r = 1$ мкм и интервалом

между ними $a = 5$ мм радиальная плазменная частота составляет примерно 8,2 ГГц.

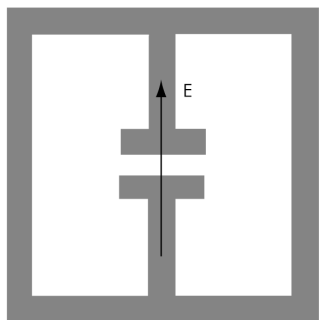


Рис. 19. Альтернативный вариант элемента ENG-среды

ходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера Земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при $\epsilon(\omega) < 0$), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением.

В числе искусственных сред с отрицательной ϵ одной из первых была описана система из тонких металлических проводников, расположенных параллельно (рис. 18).

О такой среде как искусственном диэлектрике для микроволновых применений сообщалось

Наряду с проводными структурами известны и другие конструкции искусственных ENG-материалов. Например, описаны элементы со структурой, изображенной на рис. 19. Индуктивные петли, образованные двумя разрезными рамками, создают взаимно противоположные магнитные поля, компенсирующие друг друга. В результате характеристики от-