

УДК 537.87, 621.396.67

УГЛОВОЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

И. В. Бычков¹, Д. В. Дубровских¹, И. С. Зотов¹, Д. А. Павлов¹, А. А. Федий¹,
В. Г. Шавров²

¹Челябинский государственный университет, г. Челябинск

²Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва

Получена 25 мая 2011 г.

Аннотация. В работе описывается конструкция углового спектрометра, а также методика измерений коэффициента пропускания (Т) и отражения (R) композитных и метаматериалов. Представлены результаты экспериментальных исследований некоторых метаматериалов в диапазоне 8-12 ГГц.

Ключевые слова: СВЧ, метаматериалы, электромагнитный кристалл, анизотропия, зонная структура, угловой спектрометр.

Abstract. The paper describes the construction of the angular spectrometer and the method of measurement of the transmission coefficient (T) and reflection (R) composites and metamaterials. The results of experimental studies of some metamaterials in the range of 8 – 12 GHz are presented.

Keywords: microwave range, metamaterials, electromagnetic crystal, anisotropy, the band structure, angular spectrometer.

Введение

Метаматериалы - это искусственно созданные среды с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Электродинамические характеристики таких материалов существенно отличаются от характеристик элементов их составляющих. При этом, надо отметить, что метаматериалы с необычными электродинамическими характеристиками не встречаются в природе и достаточно сложны в изготовлении. Такие материалы вызывают как

академический, так и практический интерес в связи с их уникальными свойствами.

Метаматериалы принято классифицировать по трём основным группам: ϵ – негативные материалы, μ – негативные материалы и метаматериалы с одновременно отрицательными значениями как ϵ , так и μ .

Метаматериалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью (ϵ – негативные материалы). Характерным примером ϵ – негативной среды является система из тонких металлических стержней расположенных параллельно друг к другу (рис. 1). В работе [1] такие структуры названы электромагнитным кристаллом.

Данная структура имеет характерную зонную структуру в частотном диапазоне: в зависимости от длины падающей электромагнитной волны наблюдаются зоны прозрачности и непрозрачности, т. е. данный материал в одной полосе частот пропускает, а в другой не пропускает электромагнитное излучение.

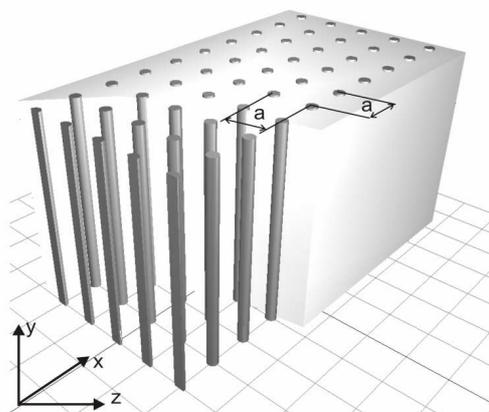


Рис. 1. Пример структуры метаматериала с отрицательным значением ϵ ; a – постоянная решетки.

Метаматериалы с отрицательной магнитной проницаемостью (μ – негативные материалы) представляют собой регулярную трехмерную структуру, образованную индуктивно-щелевыми резонаторами. (split-ring resonator [2]). Резонаторы имеют вид плоских колец или квадратов с разрезом в

виде щели. Часто применяют связанные резонаторы в виде двух коаксиальных колец или квадратов, вставленных один в другой.

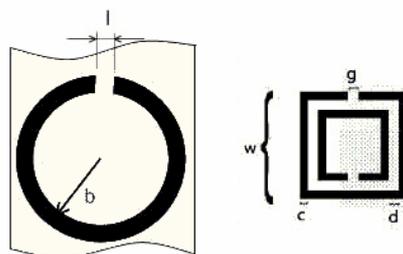


Рис. 2. Некоторые типы плоских резонаторов СВЧ диапазона, применяемые в метаматериалах.

Размеры резонаторов намного меньше длины волны, на которой они возбуждаются. Типичные размеры таких резонаторов, настроенных на частоту ~ 10 ГГц, таковы: диаметр $\approx 3 - 4$ мм, размер щелей $\approx 0,4 \times 0,2$ мм².

На рис. 2 приведен характерный вид резонаторов. Обычно резонаторы изготавливают методами травления меди с фольгированного стеклотекстолита. Для улучшения характеристик метаматериалов, получения изотропных или анизотропных свойств, могут применяться более сложные конфигурации резонаторов.

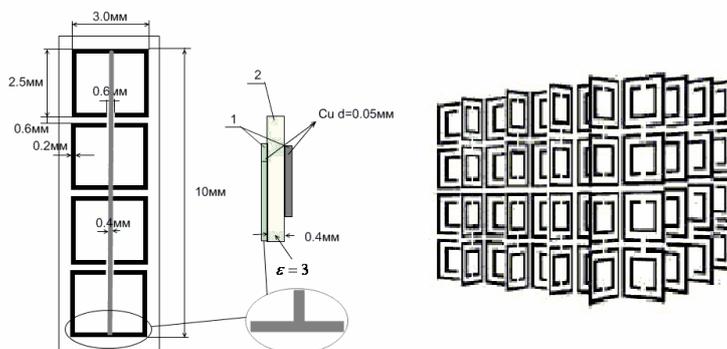


Рис. 3. Структура метаматериала с отрицательным коэффициентом преломления, 1-слой меди, 2-стеклотекстолит.

Метаматериалы, имеющие одновременно отрицательное значение, как эффективной диэлектрической проницаемости, так и магнитной, состоят из регулярных структур, содержащие резонаторы и линейные проводники. В таких материалах показатель преломления так же будет иметь отрицательное

значение (-n). Поэтому такой материал будет проявлять совершенно необычные оптические свойства, такие как аномальное лучепреломление, сверхразрешение. На рис. 3 приведен характерный вид и структура метаматериалов, имеющих отрицательный показатель преломления.

На рис. 4 показано направление распространения плоской волны в метаматериале после преломления на границе раздела сред [3].

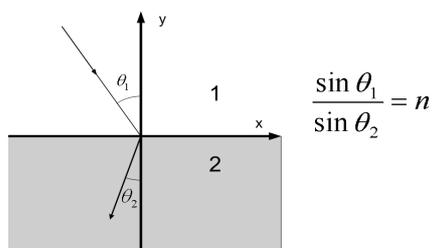


Рис. 4. Преломление плоской волны на границе раздела вакуум (1) – метаматериал (2).

Методы исследований метаматериалов

Методы экспериментальных исследований метаматериалов СВЧ диапазона довольно ограничены. Элементарные ячейки, или несколько ячеек, исследуют волноводным методом. Ячейку метаматериала помещают в волновод и измеряют АЧХ по коэффициенту отражения или пропускания в соответствующем частотном диапазоне. На основании полученных АЧХ и ФЧХ характеристик прогнозируют свойства материала, построенного из таких ячеек.

Исследования композитных и метаматериалов затруднены из-за необходимости изготовления образцов больших объемов, что приводит к сложности изготовления. При исследовании малых объемов композитных материалов волноводным методом неизбежно возникают ограничения связанные малым числом ячеек метаматериала в исследуемом образце волновода. Некоторые исследуемые образцы, например, такие как регулярные проводящие структуры, имеют размер гораздо больший сечения стандартного волновода (23x10), что делает невозможным исследование их электродинамических характеристик данным методом. А измерение

характеристик образцов материалов малого объема с применением рупорных антенн неизбежно возникают проблемы, обусловленные краевыми эффектами и нежелательными отражениями от краев рупоров.

Описанный в данной статье угловой спектрометр, прототипом которого служила установка, представленная в работе [4], позволяет избежать этих трудностей и измерять коэффициенты R и T без влияния краевых и интерференционных эффектов. Кроме того существенно сокращаются затраты на изготовление образцов для исследования, т.к. для исследования необходимы малые объемы.

Угловой спектрометр

Электрическая структурная схема прибора проста и состоит из трех основных узлов: автоматизированного измерителя КСВН Р2-61 3-х сантиметрового диапазона, формирователя направленного узкого пучка СВЧ излучения и плоской измерительной камеры, позволяющей измерять угол отклонения пучка исследуемым образцом, а также коэффициенты R и T . Измерения можно проводить в частотном диапазоне 8 – 12 ГГц применяя детекторную секцию, перемещаемую по периметру измерительной камеры в пределах от 0 до $\pm 90^\circ$.

Для автоматизации измерителя Р2-61 было разработано устройство сопряжения, включающее микроконтроллер, АЦП и ЦАП. Устройство сопряжения вырабатывает напряжение развертки частоты СВЧ генератора прибора. Синхронно с изменением частоты проводится оцифровка и запись сигнала с приемной детекторной секции. Прибор управляется программно с персонального компьютера. Все оцифрованные экспериментальные данные хранятся в ПК.

Формирователь пучка СВЧ излучения представляет собой камеру длиной 400 мм, шириной 170 мм, расстояние между направляющими пластинами (широкими стенками) 12 мм. Боковые стенки камеры покрыты

двухслойным поглотителем толщиной 20 мм. Внешний слой поглотителя имеет минимальный коэффициент отражения, а внутренний слой имеет максимальный коэффициент поглощения. Готовый поглотитель для входной камеры при общей толщине 20 мм имел толщину внешнего слоя 15 мм, а внутреннего - 5 мм. Применение поглотителя исключает практически полностью появление отраженных волн, и, как следствие, паразитной интерференционной картины. От входного фланца камеры до боковых стенок поглотитель расположен под углом. Это также уменьшает нежелательные эффекты, связанные с отраженными волнами (рис.5).

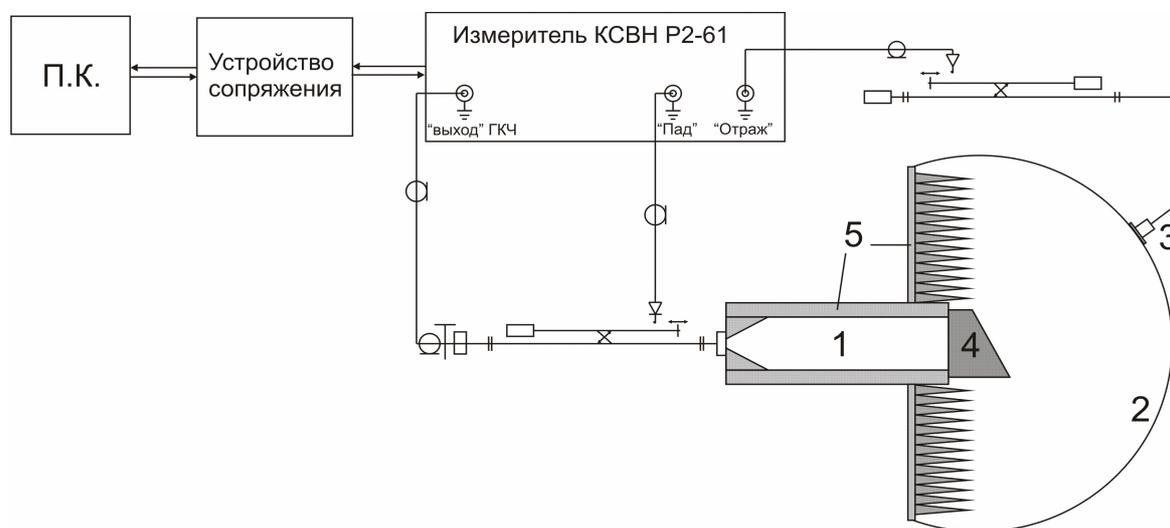


Рис. 5. Схема электрическая структурная измерения показателей преломления, 1-формирователь пучка СВЧ излучения, 2-измерительная камера, 3-приемная детекторная секция, 4-исследуемый образец, 5-поглотитель.

Результат влияния поглощающих покрытий на формирование пучка показан на рис. 6. На нём приведены результаты измерений СВЧ мощности направленного пучка в выходном сечении камеры формирователя. При отсутствии поглотителя на боковых стенках формируются два выходных пучка СВЧ (рис. 6, кривая 1). Но если стенки камеры покрыты поглотителем, то формируется один выходной пучок, причем в два раза уже выходного отверстия камеры (рис. 6, кривая 2). Интерференционные эффекты в пучке полностью отсутствуют.

Небольшая асимметричность интенсивности выходного пучка связана с неизбежной не идеальностью реального устройства. Числовая апертура выходного пучка в плоскости направляющих пластин составила 0,15.

Камера формирователя возбуждается стандартным волноводом 23x10 мм². СВЧ излучение из формирователя попадает на исследуемый образец, расположенный между двумя полукруглыми пластинами, образующими измерительную камеру. Расстояние между пластинами 12 мм. По периметру пластин перемещается приемная детекторная секция. Между пластинами также помещен поглотитель (рис. 5) для уменьшения нежелательных отражений в камере.

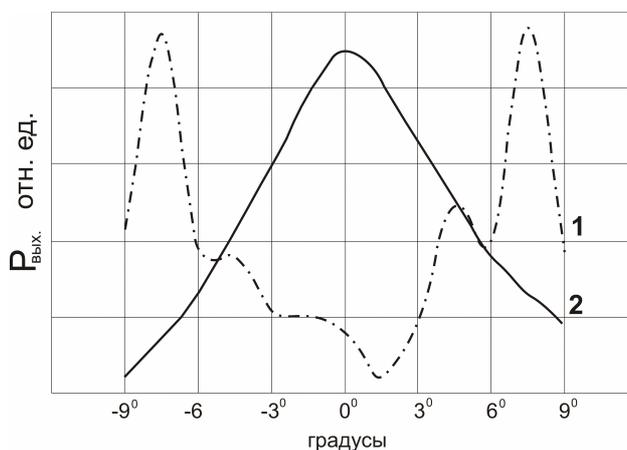


Рис. 6. Распределение мощности СВЧ в выходном сечении формирователя; 1 – без поглотителя, 2 - с поглотителем.

Образцы для исследований помещаются в полукруглую камеру таким образом, чтобы падающее излучение составляло нормаль к входной плоскости исследуемого образца. Центр окружности, по которой перемещается приемная детекторная секция, должен находиться на выходной грани образца.

Тестовые измерения точности углового спектрометра проводили с применением фторопластовой призмы. Размеры призмы приведены на рис. 7.

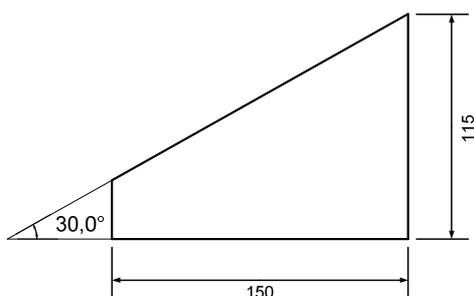


Рис. 7. Фторопластовый образец для тестовых измерений.

Толщина призмы 12 мм, такова, что она полностью заполняла пространство между проводящими плоскостями измерительной камеры. Тестовые измерения проводились в два приема. Сначала измерялось угловое распределение излучения в спектрометре без образца. Затем в измерительную камеру помещался фторопластовая призма, измерялось отклонение пучка и угловое распределение его интенсивности. Результаты измерений приведены на рис. 8. При нормальном падении пучка на входную грань фторопластовой призмы (с углом при вершине 30°) выходной пучок отклонился от оси прибора на $13^\circ \pm 2^\circ$ (43° от нормали к разделу сред), чему соответствует $n=1,36$. Расчетный угол отклонения $12,5^\circ$; или $42,5^\circ$ от нормали к разделу сред, при $n=1,35$ [5].

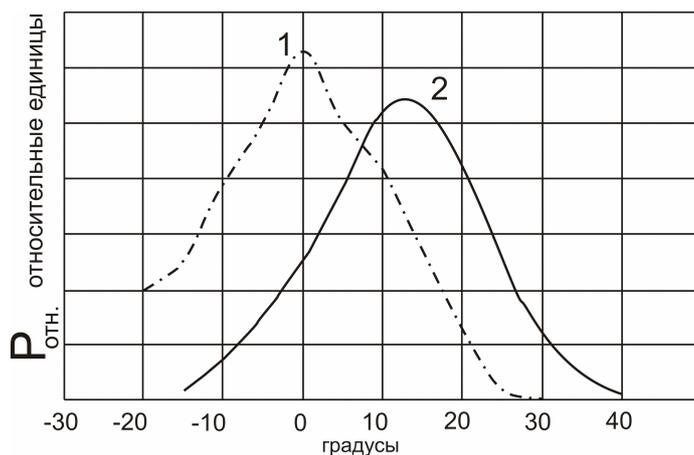


Рис.8. Экспериментальные кривые измерений коэффициента преломления; отсчёт угла от оси установки, частота 10ГГц, 1-пустая камера, 2-клин фторопласта.

Проверка АЧХ углового спектрометра проводилась с помощью измерителя КСВН Р2-61. Спектрометр имеет плоскую, без каких-либо особенностей, АЧХ во всем диапазоне частот от 8 до 12 ГГц.

Измерение коэффициента пропускания метаматериалов

μ - отрицательные материалы

Для проведения исследований был изготовлен тонкий образец метаматериала из биизотропных ячеек. Образцы изготавливались из фольгированного стеклотекстолита толщиной 0,5 мм, толщина фольги составляла 35 мкм. Так как сразу сложно изготовить резонаторы с нужной частотой, то в резонаторах были предусмотрены выступы на концах щели в резонаторе. Подгонкой длины этих выступов резонатор настраивался на частоту $\nu \approx 10$ ГГц. После уточнения геометрических размеров резонатора изготавливалась серия.

В плоскости xz (рис. 9) образец содержал $n=6$ и $k=15$ ячеек, а в вертикальном направлении только 2.

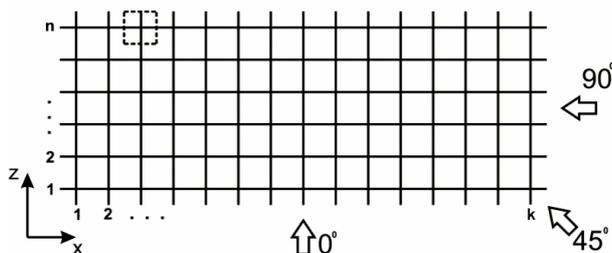


Рис. 9. Двумерная модель изотропного метаматериала, изготовленного из биизотропных ячеек. $n=6$, $k=15$.

Предполагалось, что такой образец будет изотропен в плоскости xz , то есть положение границы между зонами прозрачности и непрозрачности метаматериала не будет зависеть от ориентации образца относительно направления падающей волны.

Были проведены измерения при трех характерных ориентациях образца: 0° , 45° и 90° относительно направления распространения СВЧ излучения. На рис. 9 направление падающего излучения показано стрелками. Результаты измерений коэффициента пропускания приведены на рис. 10.

АЧХ исследованного образца при углах 0° и 90° должны были бы быть одинаковыми. Но, в диапазоне 9,5 – 11 ГГц при ориентации 0° образец пропускает излучение, в то время как при ориентации 90° он непрозрачен. Это связано с тем, что частотная зависимость коэффициента пропускания в первом случае формируется только 6 слоями ячеек, а во втором 15 слоями. Этим объясняются и впадины в данном частотном интервале на кривой 1 рис. 10.

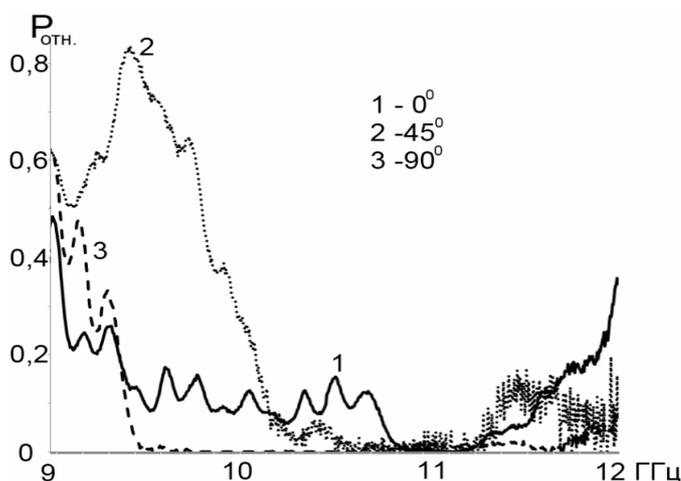


Рис. 10 Частотная зависимость зон прозрачности и непрозрачности двумерной биизотропной модели метаматериала, где $P_{отн.}$ – относительная мощность.

При облучении образца волной, падающей под углом 45° , этой волной возбуждаются все резонаторы первого слоя образца. При облучении образца под углом 0° или 90° падающая волна возбуждает только половину резонаторов первого слоя, т.к. в этом случае возбуждаются только резонаторы, ось которых параллельна вектору \mathbf{H} падающей волны. По-видимому, это приводит к смещению границы прозрачности, кривые 1,2 (рис. 10).

ϵ – отрицательные материалы

Одна из возможных реализаций материала с отрицательной диэлектрической постоянной – использование двумерной решетки, сформированной из тонких параллельных проводников. Такая модель решетки, названная электромагнитным кристаллом, была теоретически исследована в работе [1]. Помимо отрицательной диэлектрической проницаемости, такой кристалл интересен зонной структурой в частотном диапазоне: в зависимости от частоты кристалл может пропускать или не пропускать электромагнитное излучение.

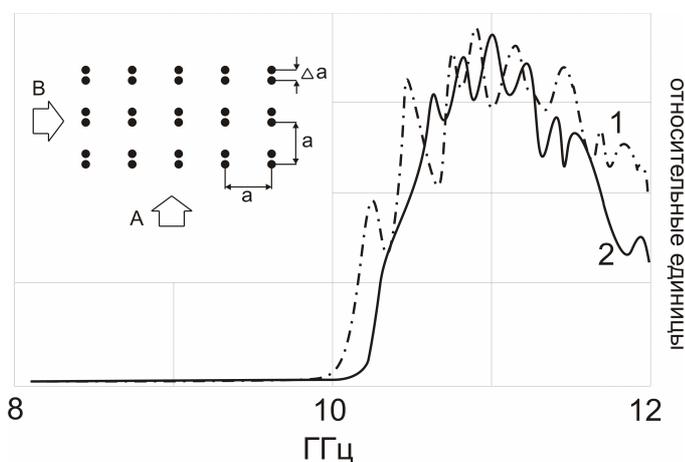


Рис. 11. Экспериментальные кривые измерений коэффициента пропускания.

Исследуемые образцы имели двумерную решетку, сформированную из тонких параллельных проводников. Проводники располагались в вершинах квадратов $a \times a$, где $a=22$ мм. Была сформирована и вторая точно такая же решетка, но со смещением относительно первой на 2 мм. Таким образом была сформирована анизотропная структура. Схематически такой образец изображен на врезке рис. 11. Образцы изготавливались из медных стержней диаметром $d=0,7$ мм и длиной 12 мм, помещенных в брусок из пенопласта с размерами $150 \times 80 \times 12$ мм³. Результаты измерений полос прозрачности в диапазоне 8-12 ГГц приведены на рис. 11., Кривая 1 соответствует полосе пропускания образца при облучении с направления, обозначенного стрелкой А, кривая 2 – при облучении

образца с направления В. Как и ожидалось, анизотропия образца привела к угловой зависимости полосы прозрачности.

Заключение

Разработан и автоматизирован угловой спектрометр на базе измерителя КСВН Р2-61. Тестовые измерения на фторопластовой призме показали, что прибор можно использовать для точных угловых измерений.

С помощью углового спектрометра были также проведены измерения полос прозрачности двух образцов метаматериала: биизотропного метаматериала с отрицательной магнитной проницаемостью на основе индуктивно-щелевых резонаторов и анизотропного метаматериала с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Измерения показали, что приборная точность позволяет выявлять эффекты, связанные с неоднородностью и анизотропией образцов.

Литература

1. П.А. Белов «Дисперсионные и отражательные свойства двухмерного электромагнитного кристалла из реактивно нагруженных проводников» с.162-170.
2. R.A. Shelby, D.R. Smith, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial // Applied physics letters, Volume 78, Number 4, 22 January 2001-p.489-491.
3. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // УФН.-1967.-Т.91,№3.-С.517.
4. Starr A.F., Rye P.M., Mock J.J., Smith D.R. Angle resolved microwave spectrometer for metamaterials studies // Review of Scientific Instruments. Vol. 75, №4. P.820-825.
5. <http://www.ufapolimer.ru/ftor1.htm>