

С.Сейфуллиннің 125 жылдығына арналған «Сейфуллин оқулары – 15: Жастар, ғылым, технологиялар: жаңа идеялар мен перспективалар» атты халықаралық ғылыми-теориялық конференциясының материалдары = Материалы Международной научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения – 15: Молодежь, наука, технологии – новые идеи и перспективы», приуроченной к 125-летию С.Сейфуллина. -2019. - Т.II, Ч 1 - С.246-248

## **ЭФФЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛА В КОНСТРУКЦИИ ВОЛНОВОДОВ**

*Равкатова Г.Р., Шоханова Т.И.*

В последние годы все больший интерес приобретает использование в технике СВЧ так называемого метаматериала – композитного материала, не существующего в природе и отличающегося отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, как по отдельности (SNG – singlenegative), так и одновременно (DNG – doublenegative). В последнем случае среда приобретает новые удивительные свойства, такие как отрицательный коэффициент преломления, обратный эффект Доплера, отрицательная групповая скорость.

Применение метаматериалов в качестве подложек печатных антенн позволяет достичь широкополосности и уменьшения массогабаритных характеристик антенных элементов. Также возможно согласование различного рода антенн с питающей линией за счет компенсации реактивности в широкой полосе частот и повышение коэффициента усиления при сохранении исходных размеров антенны [1].

Целью работы является исследование свойств распространения радиоволн в волноводных системах, заполненных метаматериалом, для оценки возможности построения на их основе антенн вытекающей волны.

Описанные выше свойства метаматериалов являются результатом специальной искусственно созданной дискретности их структуры. Величина ячеек такой структуры должна быть много меньше длины падающей на нее волны. Тогда электромагнитный отклик формируется не отдельными молекулами вещества, как это бывает в обычном случае, а структурой в целом, где строго заданная периодичность включений выступает в качестве атомной решетки.

Наибольшее распространение в СВЧ технике получили две конструкции метаматериалов. Во-первых, это сетка из тонких проводников. Во-вторых, это резонаторы из разрезных колец (SRR – splitringresonator), и их разнообразные модификации [2]. В разрезном кольцевом резонаторе магнитный поток, проходящий через металлическое кольцо, наводит в нем круговые токи, аналогичные токам, обуславливающим магнетизм некоторых материалов. А в решетке из прямых металлических стержней электрическое поле создает направленные вдоль них токи. Таким образом, использование металлической сетки приводит к большим отрицательным значениям

диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  на низких частотах [3], а кольца с разрезами могут имитировать материал с отрицательной магнитной проницаемостью  $\mu$ .

Наиболее ярко новые свойства проявляются при резонансном возбуждении включений. Объединение кольцевых резонаторов и металлических проводников в решетку приводит к созданию биотрицательной (DNG) среды.

При исследовании распространения радиоволн в направляющих структурах, заполненных метаматериалом, в частности в волноводах, становится актуальным такое явление как обратная волна – волна с отрицательной групповой скоростью. Если проницаемости диэлектрика  $\epsilon$  и  $\mu$ , заполняющего волновод, отрицательны, векторы  $E$ ,  $H$  и волновой вектор  $k$  образуют левую тройку (отсюда еще одно название метаматериала – левая среда). Тогда вектор Пойнтинга и волновой вектор  $k$  противонаправлены [3]. Для однородной плоской монохроматической волны в однородной изотропной непоглощающей (неусиливающей) среде знак групповой скорости задается только законом дисперсии среды [4].

В прямоугольном волноводесоответствии с формой описанных выше элементарных ячеек, метаматериаланизотропен, и оказывает различное влияние на характеристики систем в зависимости от ориентации относительно падающей волны.

Указанного недостатка лишена модифицированная структура резонаторов из разрезных колец (MSRR), изображенная на рисунке 1 [5]. Структура представляет собой два квадратных DSRR, вытравленных на разных сторонах диэлектрической пластины и повернутых друг относительно друга на 90 градусов. Такой элемент имеет меньшие электрические размеры и гораздо больший диапазон частот, в котором эффективная проницаемость отрицательна. Симметрия устраняет бианизотропность, а размеры структуры получаются меньше одной десятой рабочей длины волны.

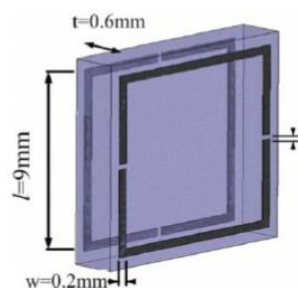


Рисунок 1 - Эскиз модифицированного SRR

Использование решетки MSRR в волноводе приводит не к появлению узкой полосы пропускания ниже критической частоты, а к значительному снижению критической частоты всей волноводной системы в целом, как для

прямой, так и для обратной волн, за счет сильной электромагнитной связи между последовательными элементами. Однако, по этой же причине происходит уменьшение уровня передачи. Для решения этой проблемы необходимо введение в структуру дополнительных индуктивных "окон" [6].

Дальнейшее исследование может быть направлено на изучение свойств прямоугольного волновода, частично заполненного метаматериалом, а также свойств антенны вытекающей волны на его основе. Могут быть получены зависимости коэффициента замедления излучающей структуры, угла наклона и ширины диаграммы направленности от геометрических размеров включений метаматериала, шага и степени заполнения волновода.

Исследовано понятие метаматериала, описывается его суть, приведены свойства и причины их возникновения. Представлены различные варианты исполнения метаматериалов, дана методика расчета их резонансной частоты. Вводятся понятия отрицательной групповой скорости, левой среды, прямой и обратной волн. Исследованы эффекты применения метаматериалов в конструкциях волноводов различного рода и форм поперечного сечения. Проанализировано влияние ориентации включений относительно падающей волны на характеристики направляющей структуры. Сделан вывод о возможности использования волновода, заполненного метаматериалом, в основе конструкции антенны вытекающих волн.

*Научный руководитель: Соболева Л.А., ст. преподаватель, магистр*

### **Список литературы**

1. Д.Ю. Муромцев, Ю.Т. Зырянов, П.А. Федюнин, О.А. Белоусов, А.В. Рябов, Е.В. Головченко, Электродинамика и распространение радиоволн, Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. - 199 с.
2. Мельников М.Я., Трахтенберг Л.И. Синтез, строение и свойства металл/полупроводник содержащих наноструктурированных композитов, Москва: Техносфера, 2016.-614 с.
3. Слюсар В. Метаматериалы в конструкциях антенн. //Электроника: наука, технология, бизнес. - 2010. - №. 8, 66-70с.
4. Lin, Yu-Ping; Nandkishore, Rahul M. Kohn-Luttinger superconductivity on two orbital honeycomb lattice PHYSICAL REVIEW B , Том: 98, Выпуск: 21, Номер статьи: 214521, 2018
5. Capet N., Byrne B., Claudepierre L., Raveu N. Metamaterialwaveguide with reducedcross section.2013 7th EuropeanConferenceonAntennas and Propagation (EuCAP). 8-12 April 2013. Gothenburg, Sweden. pp. 2155-2157.
6. 10. Pollock J.G., Iyer A.K. Below-cutoffpropagation in metamaterial-linedcircularwaveguides. IEEE Transactionsonmicrowavetheory and techniques. Vol. 61, no. 9, September 2013.