

Открытый резонатор с активной микрополосковой решеткой

А. В. Архипов, И. К. Кузьмичев, О. Г. Нечаев, Д. Г. Селезнев¹

*Институт радиофизики и электроники имени А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, Харьков, 61085, Украина
E-mail:kuzmichev@syndicate.org.ua*

*¹Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail:sad@ira.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 14 августа 2006 г.

Рассматривается полусферический открытый резонатор (ОР), на плоском зеркале которого расположен усилительный модуль, представляющий собой усилитель мощности, конструктивно объединенный с четырехэлементной микрополосковой решеткой (МПР). Приведены экспериментальные кривые резонансного коэффициента передачи ОР, возбуждаемого усилительным модулем и МПР. Все измерения выполнены в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Показана перспективность применения такой открытой электродинамической системы для измерения диэлектрической проницаемости веществ с большими потерями.

1. Введение

В настоящее время открытые резонаторы (ОР) широко используются в качестве электродинамических систем для измерения электромагнитных характеристик различных веществ [1-5]. Для таких измерений наиболее удобной формой построения ОР является полусферическая. В этом случае резонатор образован плоским и сферическим отражателями, а исследуемый образец располагается на поверхности плоского зеркала, что сразу решает целый ряд проблем. Во-первых, плоский образец может быть как жидким, так и твердым и иметь любые поперечные размеры. Во-вторых, устраняется возможный перекося образца, поскольку в этом случае плоскость образца всегда будет совпадать с плоскостью зеркала. В-третьих, образец располагается в области плоского фазового фронта возбуждаемого в ОР колебания (наиболее часто при проведении подобных исследований используется низшее

колебание TEM_{00q} , где q – число полуволн вдоль оси резонатора). Благодаря этому снижаются потери, обусловленные возмущением рабочего колебания резонатора исследуемым образцом. Как правило ОР полусферической или сферической геометрий используются для измерения электрических характеристик веществ с малыми потерями, поскольку образцы с большими потерями приводят к срыву колебаний в таких резонансных системах.

Для измерения электромагнитных характеристик веществ, обладающих большими потерями, в сантиметровом диапазоне широко используется объемный цилиндрический резонатор с колебанием H_{01q} . С укорочением длины волны применение такого резонатора будет сопряжено с определенными трудностями в связи с уменьшением его геометрических размеров и ростом поверхностного сопротивления металла, из которого он изготовлен. Использование же сверх-

размерного объемного резонатора не целесообразно, поскольку в такой резонансной системе наряду с основным колебанием H_{01q} будут возбуждаться высшие колебания, в частности E_{11q} , что в итоге приведет к ошибке измерений и необходимости принимать дополнительные меры для селекции спектра колебаний в таком резонаторе.

Поэтому для исследования толстых образцов и веществ с большими потерями, на наш взгляд, наиболее перспективным является полусферический ОР с микрополосковой решеткой (МПР), расположенной на плоском зеркале [6]. Это связано с тем, что, с одной стороны, ОР является резонансной системой широко применяемой в миллиметровом диапазоне длин волн. С другой стороны, входное сопротивление МПР за счет варьирования ее геометрических размеров можно подобрать таким образом, что оно будет близко к выходному сопротивлению усилителя мощности, который можно расположить перед МПР и согласовать с ней без дополнительных цепей, поскольку она имеет планарное исполнение. Благодаря этому упростится конструкция самого усилителя, который вместе с МПР образует единый усилительный модуль, который в дальнейшем будем называть активной МПР. При этом существенно возрастет резонансный коэффициент передачи через открытую электродинамическую систему. Такой ОР может найти практическое применение не только в технике научного эксперимента, но и в промышленности, что связано с необходимостью измерения электрических характеристик веществ с большими потерями, а также осуществления непрерывного контроля толщины листовых материалов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование полусферического ОР, на плоском зеркале которого расположена активная МПР. Решетка состоит из четырех одинаковых прямоугольных излучателей, возбуждаемых синфазно. Исследования, как и в работе [6], проведены в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

2. Расчет параметров МПР

Для эффективного возбуждения ОР с помощью МПР, расположенной на плоском зеркале, распределение поля в плоскости сферического зеркала резонатора должно совпадать с радиусом пятна поля рассматриваемого колебания равным 35.1 мм. В нашем случае это низшее колебание ОР TEM_{004} ($L = 60.7$ мм, где L – расстояние между зеркалами полусферического ОР). Как показано в работе [6], такими свойствами обладает МПР из четырех излучателей прямоугольной формы.

Для ее расчета использовалась методика, разработанная авторами в работах [7-9]. Данная методика основана на применении спектрального метода, суть которого заключается в представлении функции Грина, поля излучения и плотности тока на элементах решетки в виде разложений в интеграл Фурье. Использовалось также приближение заданного распределения поверхностного тока на элементах решетки, которое существенно упрощает процесс рассмотрения МПР и дает возможность получать достаточно точные результаты при их исследовании.

Наличие поверхностной волны в диэлектрической подложке приводит к рассогласованию элементов МПР с линиями питания, поэтому для улучшения характеристик решетки выполнен конструктивный синтез, который заключается в нахождении таких размеров излучателей решетки, при которых их входные сопротивления становятся чисто активными и равными характеристическому сопротивлению линии питания [8, 9].

Для осуществления конструктивного синтеза необходимо решить систему из $2N$ трансцендентных уравнений относительно размеров элементов, составляющих решетку:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} Z_n^{in} = Z_l^c, \\ \operatorname{Im} Z_n^{in} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$n = 1, 2, \dots, N,$$

где N – количество элементов в решетке; Z_l^c – характеристическое сопротивление линии питания; Z_n^{in} – входное сопротивление каждого элемента решетки, которое находится из решения системы нелинейных уравнений [9].

Процедура конструктивного синтеза, представляющая собой итерационный процесс, для которого начальное приближение определяется из условия согласования отдельного излучателя с линией питания, реализована в виде эффективного алгоритма для ПК.

С использованием описанной выше методики была рассчитана четырехэлементная МПР, изображенная на рис. 1. Решетка состоит из четырех одинаковых прямоугольных излучателей шириной w и длиной l , настроенных на частоту f . Питание каждого элемента осуществляется при помощи полосковых линий шириной w_l и w_L соответственно. Вся решетка питается 50-омным кабелем в точке, расположенной в центре полосковой линии шириной w_L . При этом учитывается выходное сопротивление усилителя мощности, расположенного перед МПР. Благодаря этому последний можно будет согласовать с МПР без дополнительных цепей согласования на выходе активного элемента. Решетка расположена на слое экранированного диэлектрика, характери-

зующегося толщиной h и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ .

Четырехэлементная МПР из прямоугольных излучателей была рассчитана на частоте $f = 10$ ГГц ($\epsilon = 2.08$, $d/\lambda = 0.5$, $h = 2.3$ мм, $Z_l^c = 200$ Ом). Результаты расчетов ширины питающих линий по формулам, описанным в [6], показали, что $w_l = 0.27$ мм, $w_L = 2.15$ мм. Размеры элементов решетки, полученные из решения системы уравнений (1), оказались следующими: $w = 7.65$ мм, $l = 9.2$ мм.

3. Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования проведены в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Полусферический ОР образован плоским и сферическим зеркалами диаметром 200 мм. Радиус кривизны сферического отражателя $R = 170$ мм. Вывод СВЧ-энергии из резонатора осуществляется с помощью щелевого элемента связи с размерами 23×1 мм, выполненного в центре сферического зеркала. Микрополосковая решетка расположена на поверхности плоского зеркала резонатора. Измерения проведены с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослаблений Р2-61 по стандартной методике измерения ослабления.

Проведена оценка согласования МПР с подводящим коаксиальным кабелем, имеющим волновое сопротивление 50 Ом. Длина кабеля составляла 0.8 м. Минимальный КСВН = 1.12 получен на частоте 9.806 ГГц.

Экспериментальная установка собрана на базе измерительного катетометра КМ-8, который позволяет контролировать расстояние между зеркалами ОР с точностью до 10 мкм. Оба зеркала резонатора закреплены в юстировочных обоймах. Возбуждение МПР осуществляется с помощью коаксиального кабеля, подключенного к центральному проводнику питания МПР. Такую решетку будем называть пассивной.

На рис. 2 приведена зависимость резонансного коэффициента передачи k_p ОР от частоты для колебания TEM_{004} (кривая 1). Выбор колебания TEM_{004} при проведении

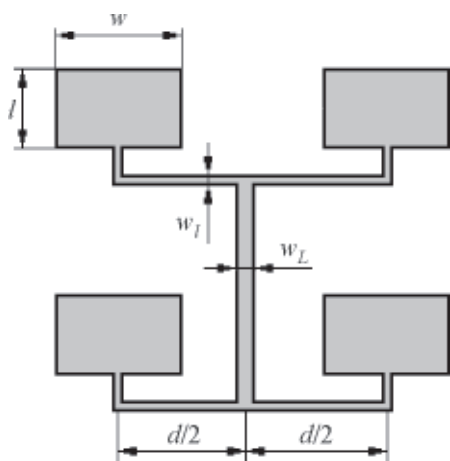


Рис. 1. Четырехэлементная МПР

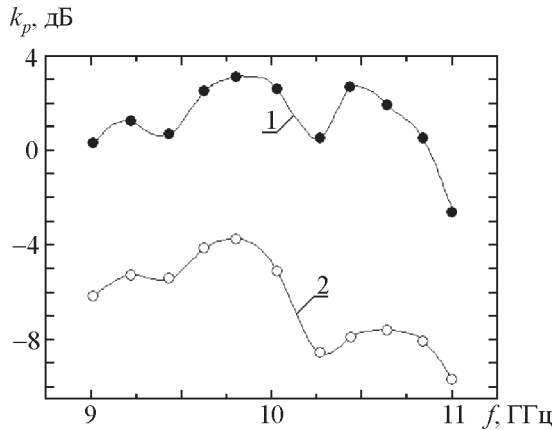


Рис. 2. Зависимости коэффициентов передачи от частоты для ОР с пассивной (кривая 1) и активной (кривая 2) МПР

исследований обусловлен тем, что полусферический ОР данной геометрии, возбуждаемый с помощью МПР, имеет максимальный коэффициент передачи [6]. Как видно из рисунка, максимальный $k_p = -3.75$ дБ резонатор имеет на частоте $f = 9.806$ ГГц, а при отстройке от этой частоты в обе стороны k_p падает. При этом нагруженная добротность ОР $Q_l = 990$ на частоте максимального коэффициента передачи. Таким образом, даже на резонансной частоте потери мощности при передаче через ОР с МПР составляют величину около 4 дБ.

В связи с этим для дополнительного усиления мощности источника СВЧ энергии, позволяющего использовать при измерениях стандартные генераторы, был спроектирован и изготовлен усилительный модуль, включающий в себя усилитель мощности и цепи питания и конструктивно объединенный с МПР в единое целое. Он помещался в центре плоского зеркала резонатора. Внешний вид усилителя мощности приведен на рис. 3. В качестве активного элемента усилителя мощности был выбран транзистор ATF-35143 фирмы Agilent Technologies. Достаточное усиление в трехсантиметровом диапазоне и высокий динамический диапазон послужили основанием для выбора данного типа активного элемента. Поскольку



Рис. 3. Внешний вид усилителя мощности

выходное сопротивление усилителя близко к входному сопротивлению МПР в рабочем диапазоне частот, это позволило обойтись без дополнительных цепей согласования на выходе активного элемента, тем самым упростив конструкцию усилителя. Усилитель имеет на рабочей частоте КСВН = 1.63 и коэффициент усиления ~ 8.7 дБ, а выходная мощность при компрессии последнего на 1 дБ составляет 25 мВт. На рис. 4 показано конструктивное исполнение усилительного

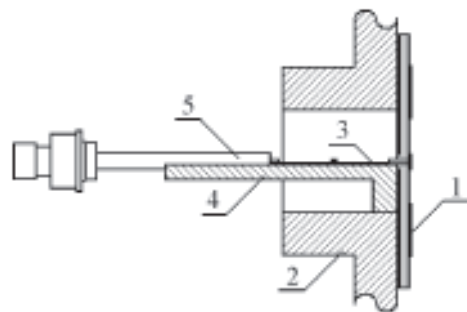


Рис. 4. Конструктивное исполнение усилительного модуля

модуля. МПР 1 расположена на поверхности плоского зеркала резонатора 2. Усилитель 3 закреплен на основании 4 и соединен с МПР без дополнительных цепей согласования. СВЧ сигнал к усилителю подводится с помощью жесткого коаксиального кабеля 5.

На рис. 2 приведена зависимость k_p от частоты для колебания TEM_{004} полусферического ОР с активной МПР (кривая 2). Как видно, во всем диапазоне изменения частоты f коэффициент передачи резко вырос. При этом максимальный $k_p = 3.1$ дБ имеет место на частоте $f = 9.806$ ГГц. В то же время при отстройке в обе стороны от указанной частоты, поведение k_p для ОР как с активной, так и с пассивной МПР идентично. Таким образом, в полусферическом ОР с активной МПР, в котором возбуждается колебание TEM_{004} , удалось получить увеличение коэффициента передачи на 6.85 дБ.

Рассмотрим применение исследованной открытой электродинамической системы для измерения относительной диэлектрической проницаемости ϵ и потерь $\text{tg}\delta$ листовых материалов с малыми и большими потерями. В качестве материала с малыми потерями использовалось оргстекло толщиной 4 мм, а в качестве материала с большими потерями – электротехнический гетинакс толщиной 3 мм. Исследуемые материалы помещались на плоское зеркало полусферического ОР с активной МПР. Поперечные размеры материалов составляли 150×150 мм. В резонаторе возбуждался тип колебаний TEM_{004} . При этом нагруженная добротность ОР с активной МПР на плоском зеркале $Q_l = 914$.

Затухание, вносимое в резонансную систему оргстеклом, составило –6 дБ, а гетинаксом –9 дБ, но, тем не менее, уровень выходного сигнала был достаточен для проведения измерений. В то же время в ОР с пассивной МПР, при расположении гетинакса на плоском зеркале, возбудить рассматриваемое колебание не удалось. Здесь необходимо отметить, что ϵ оргстекла является диэлектрической постоянной, не зависящей от частоты, так как для такого ма-

териала коэффициент поглощения существенно меньше показателя преломления [10, 11], а для электротехнического гетинакса диэлектрическая проницаемость ϵ зависит от частоты.

Измерения проведены с помощью панорамного измерителя КСВН и ослаблений Р2-61 по стандартной методике измерения ослабления при фиксированном расстоянии L между зеркалами ОР. Для определения диэлектрической проницаемости рассматриваемых материалов воспользуемся формулой [11]

$$\epsilon = \left(1 + \frac{\Delta f L}{df} \right)^2 - 2(1 - \cos \varphi) \frac{\Delta f L}{df}, \quad (2)$$

где $f = 9.806$ ГГц – резонансная частота, на которой проводятся измерения; d – толщина измеряемого образца; Δf – частотная отстройка; φ – угол наклона образца к оси резонатора. В нашем случае $\varphi = 90^\circ$. После подстановки численных значений в формулу (2) получим: для оргстекла $\epsilon = 2.5$, а для гетинакса $\epsilon = 3.75$.

Для измерения $\text{tg}\delta$ воспользуемся выражением [11]

$$\text{tg}\delta = \left(\frac{1}{Q_l^1} - \frac{1}{Q_l} \right) \frac{L \sqrt{\epsilon - \sin^2 \varphi}}{d \epsilon}, \quad (3)$$

где Q_l^1 и Q_l – нагруженные добротности резонатора соответственно с измеряемым образцом и без него. Добротность ОР определялась измерением ширины резонансной характеристики на экране панорамного измерителя КСВН и ослаблений Р2-61 с помощью частотных меток. Как оказалось в случае образца из оргстекла $Q_l^1 = 276$, а для образца из электротехнического гетинакса $Q_l^1 = 178$. После подстановки этих значений и полученных выше значений ϵ в выражение (3) найдем, что для оргстекла $\text{tg}\delta = 0.019$, а для гетинакса $\text{tg}\delta = 0.041$.

Сравнение полученных значений ϵ и $\text{tg}\delta$ с данными измерений других авторов [11, 12]

показывает их удовлетворительное совпадение. При этом средняя квадратичная ошибка измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь не превышает 10 %.

4. Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что полусферический ОР, возбуждаемый активной МПР, может быть с успехом применен для исследования электромагнитных свойств и контроля толщины листовых материалов с большими потерями. Это связано с существенным увеличением коэффициента передачи через такую резонансную систему за счет использования транзисторного усилительного модуля, который в силу конструктивных особенностей хорошо согласуется с МПР. Кроме того, такие открытые электродинамические системы могут найти применение в исследованиях резонансными методами композитных материалов [13].

Литература

1. Afsar M. N., Li X., Chi H. An automated 60 GHz open resonator system for precision dielectric measurement // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1990. – Vol. 38, No. 12. – P. 1845-1853.
2. Власов С. Н., Копосова Е. В., Мазур А. Б., Паршин В. В. Об измерении диэлектрической проницаемости резонансным методом // Изв. вузов. Радиофизика. – 1996. – Т. 39, №5. – С. 615-623.
3. Damaskos N. J., Kelsall B. J. Cavity techniques for substrate properties at microwave/millimeter-wave bands // Microwave J. – 2003. – No. 12. – P. 112-124.
4. Dudorov S. N., Lioubtchenko D. V., Mallat J. A., Räisänen A. V. Two differential open resonator techniques for measuring dielectric constants of thin films on substrates // 35th European Microwave Conference. – Paris, (France). – 2005. – P. 365-367.
5. Власов С. Н., Копосова Е. В., Мясникова С. Е., Паршин В. В. Открытые резонаторы с тонкими диэлектрическими пластинами // Изв. вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, №3. – С. 219-226.
6. Архипов А. В., Кузьмичев И. К., Резник И. И., Селезнев Д. Г. Микрополосковая решетка в открытом резонаторе // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2004. – Т. 7, №4. – С. 7-11.

7. Просвирнин С. Л., Нечаев Ю. Б. Расчет микрополосковых антенн в приближение заданного распределения поверхностного тока. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1992. – 112 с.
8. Просвирнин С. Л., Резник И. И., Селезнев Д. Г. Согласование с линиями питания и учет взаимного влияния в микрополосковых антенных решетках // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, №10. – С. 1-4.
9. Селезнев Д. Г., Резник И. И., Селезнев А. Д. Микрополосковые антенные решетки из прямоугольных излучателей // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №1. – С. 52-58.
10. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1. / Под ред. Ю. В. Корицкого, Б. М. Тареева. – М.: Энергия, 1974. – 584 с.
11. Дрягин Ю. А., Чухвичев А. Н. Измерение параметров твердых диэлектриков в коротковолновой части миллиметрового диапазона резонансным методом // Изв. вузов. Радиофизика. – 1969. – Т. 12, №8. – С. 1246-1248.
12. Хиппель А. Р. Диэлектрики и их применение / Пер. с англ. под ред. Д. М. Казарновского. – М.: Государственное энергетическое издание, 1959. – 336 с.
13. Moss C. D., Grzegorzczak T. M., Zhang Y., Kong J. A. Numerical studies of left handed metamaterials // Progress in electromagnetics research. – 2002. – №35. – P. 315-334.

Відкритий резонатор з активною мікросрічковою решіткою

**О. В. Архипов, И. К. Кузьмичев,
О. Г. Нечаев, Д. Г. Селезнев**

Розглядається півсферичний відкритий резонатор (ВР), на плоскому дзеркалі якого знаходиться підсилювальний модуль, що є підсилювачем потужності, конструктивно з'єднаним з чотирьохелементною мікросрічковою решіткою (МСР). Наводяться експериментальні криві резонансного коефіцієнту передачі ВР, збуджуваного підсилювальним модулем та МСР. Усі вимірювання виконано в 3-см діапазоні довжин хвиль. Показано перспективність застосування такої відкритої електродинамічної системи для вимірювання діелектричної проникності речовин з великими втратами.

Open Resonator with an Active Microstrip Array

**A. V. Arkhipov, I. K. Kuzmichev,
O. G. Nechaev, and D. G. Seleznyov**

An hemispherical open resonator (OR) whose flat mirror carries an amplifier modul, being a power amplifier structurally integrated with a four-element microstrip array (MSA), is discussed. The experimental curves pertaining to the resonance transfer factor of the OR excited by the amplifier module and the MSA are shown, all the measurements made at the X-band. Such an open electrodynamic system is shown to be promising in terms of measuring the permittivity of high-loss substances.