

УДК 621.371, 621.372

РЕЗОНАТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТОНКИХ ПЛЁНОК

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской Академии Наук, 141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 5 июля 2019 г.

Аннотация. В данной работе рассмотрен резонатор прямоугольного сечения с длинным узким щелевым отверстием по всей широкой стенке. Модифицированный резонатор предназначен для измерения комплексной диэлектрической проницаемости разного класса тонких плёнок. Резонатор работает на фиксированных частотах: 8.33 ГГц и 10.15 ГГц. На базе скалярного анализатора цепей Р2-61 собрана экспериментальная установка с модифицированным резонатором. Для определения значений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости выбрана резонаторная методика. Продемонстрирована работа резонатора при исследовании реальных образцов резистивной бумаги.

Ключевые слова: скалярный анализатор цепей, резонатор, комплексная диэлектрическая проницаемость, тонкоплёночные материалы.

Abstract. In this paper, a resonator of rectangular cross-section with a long slit hole along the entire wide wall is considered. A basic unit of a measurement system is a scalar network analyzer R2-61. The limits of measurement depend on the ratio of the sample volume to the volume of the resonator, the coupling coefficient of the diaphragm, the accuracy of the frequency measurement, the reflection coefficient, as well as the properties of the studied material. The absolute values of the real and imaginary parts of the dielectric constant vary widely, which is usually associated with the composition and structure of the material. This may be especially true for measurements of thin-film materials. To expand the possibilities of studying various films, a modified rectangular resonator with a slit hole along the entire wide wall was developed and manufactured. The volume of the measured sample in such a resonator

can vary widely by increasing the length of the sample. The resonator is designed to operate at fixed frequencies: 8.33 GHz and 10.15 GHz. Checking the performance of the experimental setup with a modified resonator is confirmed by the measuring characteristics of real samples of resistive paper. A comparative analysis of the absolute values of the real and imaginary parts of the dielectric permittivity of the paper obtained by independent methods showed a good agreement.

Key words: scalar network analyzer, resonator, complex permittivity, thin-film materials.

Введение

Актуальность работы заключается в том, что для исследования электродинамических характеристик дорогостоящих новых материалов важен как малый размер самих образцов, так и отдельных элементов создаваемых конструкций. Особенностью измерений тонкоплёночных материалов, составляющих основу современной электроники, является то, что они вносят слабое возмущение в характеристики измерительного тракта. Целесообразно при этом использовать резонаторный метод измерения. Главным преимуществом резонаторного метода по сравнению с волноводным методом является то, что он позволяет извлечь комплексное значение диэлектрической проницаемости из результатов двух независимых измерений. Данный метод является основным методом, используемым при исследовании микроволновых свойств тонких проводящих плёнок. К недостаткам метода следует отнести невозможность получения результатов измерения в непрерывном частотном спектре.

В работе [1] рассмотрены возможности резонаторного метода при использовании автоматизированного комплекса на основе скалярных анализаторов цепей типа P2. Центральным узлом измерительных установок является резонатор прямоугольного сечения, в стенках которого имеются малые отверстия. Образцы в виде тонких стержней или тонкоплёночных полосок помещаются внутрь резонатора через эти отверстия. При решении

некоторых прикладных задач не хватает чувствительности аппаратуры, чтобы зафиксировать изменения при внесении в такой резонатор образца тонкой плёнки. Поэтому был разработан и изготовлен модифицированный резонатор с длинной узкой щелью по всей широкой стенке, который позволяет расширить пределы измерения диэлектрических свойств разнообразных плёнок.

Целью данной работы является разработка и изготовление модифицированного резонатора для измерения диэлектрической проницаемости тонкоплёночных образцов материалов на дискретных частотах 8,33 ГГц и 10,15 ГГц.

1. Измерительная установка

Созданная экспериментальная установка построена на базе скалярного анализатора цепей – панорамного измерителя КСВН Р2-61.

Структурная схема резонаторной установки для измерения характеристик тонкоплёночных материалов изображена на рис.1. Установка собрана в режиме на "отражение".

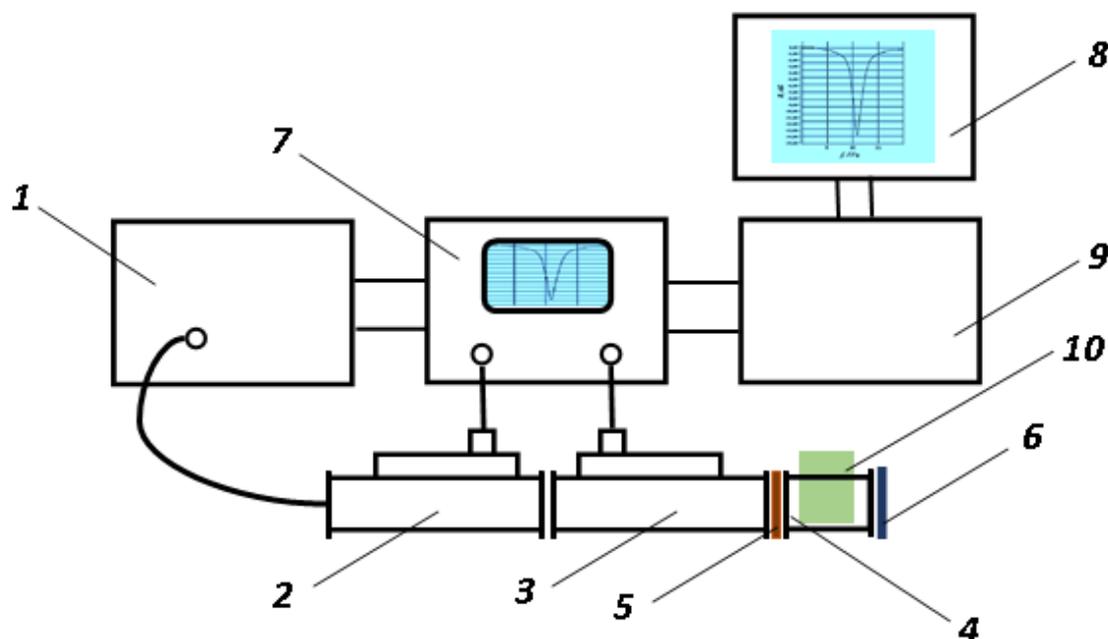


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки.

СВЧ сигнал, модулированный по частоте, от свип-генератора 1 через направленные ответвители 2 и 3 поступает в модифицированный измерительный резонатор 4 с диафрагмой связи 5 и коротко замыкающим металлическим отражателем 6. После детектирования сигнал, отраженный от резонатора, через направленный ответвитель 3 приходит на индикаторный блок 7, где сравнивается с протектированным сигналом прямой волны. На экране индикаторного блока воспроизводится резонансная кривая, представляющая частотную зависимость коэффициента отражения. Для расширения функциональных возможностей и автоматизации процесса измерений цифровой выход с индикаторного блока 7 связан с персональным компьютером 8 через модуль аналого-цифрового преобразователя 9. В качестве АЦП использован стандартный модуль серии L-Card E14-140. Отображение сигнала на мониторе компьютера, хранение и дальнейшая обработка производится с помощью специальной программы, написанной в среде *Lab View*. Программное обеспечение работает под управлением операционной системы *Windows XP*. Процессом измерений управляет компьютер, связанный со скалярным анализатором цепей через АЦП. Измерения коэффициента отражения от резонатора (с образцом и без него) проводятся на сетке частот (типичное значение - 512 точек измерения), включающей рабочий диапазон резонатора. Минимальный шаг перестройки частоты равен 0.1 МГц.

Основным узлом измерительной установки является модифицированный резонатор прямоугольного сечения с длинной узкой щелью по всей широкой стенке. Щель имеет ширину во много раз меньшую по сравнению с длиной волны. Для измерения диэлектрической проницаемости образец 10 тонкоплёночного материала помещается через эту щель в резонатор. Длина щели резонатора позволяет увеличивать длину исследуемых образцов, что дает возможность расширить динамический диапазон измеряемых материалов.

Резонатор имеет собственные резонансные частоты f_0 . Параметры резонатора приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Тип панорамного измерителя КСВН	Параметры резонатора			
	Сечение волновода $a \times b$, мм ²	Длина резонатора L , мм	Число полуволн по длине резонатора n	Резонансная частота f_0 , ГГц
P2-61	23x10	57,9	3	10,15
			2	8,33

Связь резонатора с питающей линией осуществляется с помощью диафрагмы. Диафрагма связи представляет собой тонкую металлическую пластину с квадратной щелью, либо круглым отверстием.

Характеристикой диафрагмы связи является коэффициент передачи, который определяется путём предварительной калибровки измерительной аппаратуры. Методика определения коэффициента передачи диафрагмы связи подробно описана в работе [1].

Фото различных диафрагм связи и модифицированного резонатора с образцом в виде тонкой плёнки дано на рис. 2.



Рис. 2. Диафрагмы связи и модифицированный резонатор прямоугольного сечения с тонкоплёночным образцом.

2. Расчетные формулы

Вычислительные программы для определения комплексной диэлектрической проницаемости написаны на языке *MathCad*.

Величины действительной ε' и мнимой ε'' частей диэлектрической проницаемости вычисляются по следующим формулам:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{f_0 - f_1}{f_0} \cdot \frac{V_p}{2V} \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\lambda_0^2}{\lambda_B^2} \cdot \frac{\eta [(КСВ)_1 - (КСВ)_0]}{2\pi n} \cdot \frac{V_p}{4V}, \quad (2)$$

где f_0 и f_1 – резонансные частоты резонатора без образца и с образцом соответственно; λ_0 и λ_B – резонансные длины волн в свободном пространстве и волноводе соответственно; V_p и V – объёмы резонатора и образца соответственно; η – коэффициент связи (по мощности); n – число полуволн, укладываемых по длине резонатора; $(КСВ)_0$ и $(КСВ)_1$ – коэффициенты стоячей волны на резонансных частотах без образца и с образцом соответственно.

Для определения ε' измеряемыми параметрами являются резонансные частоты f_0 и f_1 (формула 1). Диэлектрические потери определяются путем сравнения КСВ на резонансных частотах резонатора без образца $(КСВ)_0$ и с образцом $(КСВ)_1$ соответственно. В этом случае ε'' вычисляется по формуле 2.

3. Результаты измерения

Исследования характеристик тонкоплёночных материалов проведены по резонаторной методике [1]. В роли непосредственно измеряемых величин в резонаторном методе выступают резонансная частота и коэффициент отражения.

На экспериментальной установке проведены измерения диэлектрических свойств тонкоплёночных образцов на фиксированных частотах согласно таблице 1. Размеры образцов варьировались в зависимости от частоты измерения и свойств плёнок.

Основная погрешность измерения комплексной диэлектрической проницаемости возникает при определении объёма исследуемого образца. Для сравнения результатов измерения плёнок были выбраны образцы с разными длиной и толщиной, но одинаковыми объёмами.

В качестве примера приведем измерения образцов разных размеров для двух типов резистивной бумаги с сопротивлением 500 Ом на квадрат и 7 кОм на квадрат. Образцы представляли собой параллелепипеды с сечением $a_1 \times b_1$, где a_1 , b_1 – длина и толщина исследуемого образца соответственно. В таблице 2 показаны результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости образцов первого типа (№ 1, № 2) и второго типа (№ 3, № 4) полученные резонаторным методом с использованием модифицированного резонатора.

Таблица 2.

Номер образца	Размер образца $a_1 \times b_1$, мм ²	Резонансная частота, ГГц	Действительная часть диэлектрической проницаемости	Мнимая часть диэлектрической проницаемости
№1	2.4 x 0.015	10.15	23.4	67.4
		8.33	26.1	81.5
№2	2.1 x 0.02	10.15	15.6	44.7
		8.33	18.4	46
№3	2.4 x 0.015	10.15	14.1	15.1
		8.33	21.9	22.4
№4	4.2 x 0.01	10.15	9.5	10.1
		8.33	14.3	15.2

Объём измеряемых образцов, помещенных в резонатор, находится как произведение площади сечения на длину узкой стенки волновода (10 мм). Следовательно, образцы №1 и №3 имеют объём 0.36 мм³, а объём образцов № 2 и №4 равен 0.42 мм³.

Для сравнения в таблице 3 даны результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости этих же типов образцов резистивной бумаги с

использованием векторного анализатора цепей PNA-L N5230A фирмы Agilent Technologies.

Таблица 3.

Номер образца	Размер образца $a_1 \times b_1$, мм ²	Резонансная частота, ГГц	Действительная часть диэлектрической проницаемости	Мнимая часть диэлектрической проницаемости
№1	0.6 x 0.06	10.15	22.7	65.5
		8.33	25.3	79.2
№2	0.6 x 0.07	10.15	15.1	43.5
		8.33	17.9	52.4
№3	0.6 x 0.06	10.15	13.8	14.7
		8.33	20.25	21.75
№4	0.6 x 0.07	10.15	9.2	9.8
		8.33	13.5	14.5

Представленные в таблицах 2 и 3 характеристики материалов, отличаются на 3% ÷ 4% друг от друга.

Заключение

Пределы измерения зависят от отношения объёма образца к объёму резонатора, коэффициента связи диафрагмы, точности измерения частоты, коэффициента отражения, а также свойств исследуемого материала. Абсолютные значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости изменяются в широких пределах, что обычно связано с составом и структурой материала. Особенно это может касаться измерений тонкоплёночных материалов.

Для расширения возможностей исследования различных плёнок был разработан и изготовлен модифицированный резонатор прямоугольного сечения с узким щелевым отверстием по всей широкой стенке. Объём измеряемого образца в таком резонаторе может меняться в широких пределах

за счёт увеличения длины образца. Резонатор предназначен для работы на фиксированных частотах: 8.33 ГГц и 10.15 ГГц.

Отметим, что проверка работоспособности экспериментальной установки с модифицированным резонатором подтверждена измерительными характеристиками резистивной бумаги. Сравнительный анализ абсолютных значений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости бумаги, полученный независимыми способами показал хорошее соответствие.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

Литература

1. О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, Д. С. Каленов. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2017. №7.
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/7/text.pdf>

Для цитирования:

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев. Резонатор для измерения диэлектрической проницаемости тонких плёнок. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/13/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.13