

Измерение электромагнитных характеристик материалов в прямоугольном волноводе

В.И. Евсеев¹, Е.А. Лупанова², С.М. Никулин², В.В. Петров²

¹ООО Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация: Обсуждается волноводный метод измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости плоских образцов изоляционных материалов, инвариантный к положению образца отрезке волновода. Исключение влияния коаксиально-волноводных переходов на результаты измерений выполняется LRT-методом. Измеряемые параметры определяют в диапазоне частот минимизацией целевой функции

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, волновое сопротивление, фазовая скорость, S-параметры, анализатор цепей, целевая функция

1. Введение

Электромагнитные свойства материалов различной физической природы, включая мета материалы, в диапазоне сверхвысоких частот характеризуют относительной комплексной диэлектрической $\dot{\epsilon}$ и магнитной $\dot{\mu}$ проницаемостью:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \epsilon' - i\epsilon'' \\ \dot{\mu} &= \mu' - i\mu''\end{aligned}\quad (1)$$

Потери электромагнитной энергии оценивают величиной тангенсов углов электрических $\text{tg}\delta_e$ и магнитных $\text{tg}\delta_m$ потерь:

$$\begin{aligned}\text{tg}\delta_e &= \epsilon''/\epsilon', \\ \text{tg}\delta_m &= \mu''/\mu'\end{aligned}\quad (2)$$

Определение действительных ϵ', μ' и мнимых ϵ'', μ'' частей относительных комплексных проницаемостей выполняют волноводным методом по результатам измерения S-параметров отрезка прямоугольного волновода $[a \times b]$ длиной L с образцом материала длиной l и без образца. Внешний вид отрезка волновода с образцом измеряемого материала показан на рисунке 1.

В основе волноводного метода измерений лежат фундаментальные соотношения для комплексного волнового сопротивления волновода \dot{Z}_B с образцом измеряемого материала при распространении основной электромагнитной волны H_{10} :

$$\dot{Z}_B = 120\pi \sqrt{\dot{\mu}/\dot{\epsilon}} \frac{\dot{V}}{\dot{v}} = \frac{120\pi}{\sqrt{\dot{\mu}\dot{\epsilon} - \left(\frac{v_0}{2af}\right)^2}}\quad (3)$$

и комплексной фазовой скорости \dot{V} электромагнитной волны H_{10} в волноводе:

$$\dot{V} = \frac{\dot{v}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\dot{v}}{2af}\right)^2}} = \frac{v_0}{\sqrt{\mu\epsilon - \left(\frac{v_0}{2af}\right)^2}} \quad (4)$$

Здесь $\dot{v} = v_0/\sqrt{\mu\epsilon}$ - фазовая скорость электромагнитной волны в материале, из которого изготовлен измеряемый образец.

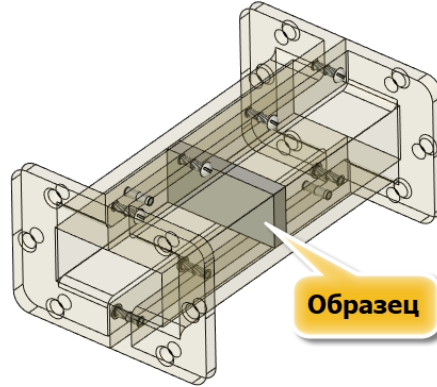


Рисунок 1. Внешний вид отрезка волновода с образцом измеряемого материала

В случае измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости образцов в виде тонких пластин, расположенных в середине широкой a стенки волновода, и не нарушающих распределения электромагнитного поля волны H_{10} , метод позволяет определить эффективные значения действительной $\epsilon'_{эфф}$ и мнимой $\epsilon''_{эфф}$ частей относительной диэлектрической проницаемости.

2. Волноводный метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости

Аналитические выражения коэффициента передачи S_{21} и коэффициента отражения S_{11} участка волновода с образцом, в предположении об идеальной проводимости стенок волновода, имеют вид:

$$S_{21} = \frac{S_{21}^a S_{12}^b \exp(-i2\pi fl/\dot{V})}{1 - S_{22}^a S_{11}^b \exp(-i4\pi fl/\dot{V})}, \quad (5)$$

$$S_{11} = S_{11}^a + \frac{S_{21}^a S_{12}^a S_{11}^b \exp(-i4\pi fl/\dot{V})}{1 - S_{22}^a S_{11}^b \exp(-i4\pi fl/\dot{V})}$$

S_{11}^a - комплексный коэффициент отражения в волноводе на границе «воздух - диэлектрик»:

$$S_{11}^a = \frac{R-1}{R+1}; \quad (6)$$

S_{21}^a и S_{12}^a - прямой и обратный комплексные коэффициенты передачи в волноводе на границе «воздух - диэлектрик»:

$$S_{21}^a = S_{12}^a = \frac{2\sqrt{R}}{R+1}; \quad (7)$$

S_{22}^a и S_{11}^b - комплексные коэффициенты отражения в волноводе на границе

«диэлектрик - воздух»:

$$S_{22}^a = S_{11}^b = -\frac{R-1}{R+1}; \quad (8)$$

R - отношение волнового сопротивления волновода с диэлектриком Z_B к волновому сопротивлению волновода без диэлектрика Z_{B0} :

$$R = \frac{Z_B}{Z_{B0}} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{2af}\right)^2}}{\sqrt{\dot{\varepsilon} - \left(\frac{v_0}{2af}\right)^2}}; \quad (9)$$

Для исключения влияния положения образца измеряемого материала длиной l в отрезке волновода длиной L и конечной проводимости стенок волновода на результаты измерения ε' и ε'' необходимо измерить S-параметры отрезка прямоугольного волновода с образцом $[S^d]$ и без образца $[S^0]$. Отношение измеренных коэффициентов передачи S_{21}^d и S_{21}^0

$$\frac{S_{21}^d}{S_{21}^0} = \frac{S_{21}^a S_{12}^b \exp(-i2\pi fl/\dot{V}_d)}{\exp(-i2\pi fl/V) (1 - S_{22}^a S_{11}^b \exp(-i4\pi fl/\dot{V}_d))} \quad (10)$$

Весьма сложная функциональная зависимость между S_{21}^d/S_{21}^0 и определяемыми величинами ε' , ε'' приводит к необходимости решения задачи минимизацией функционалов. Такая задача решается, как известно, поиском начального значения искомых величин, затем получением окончательного результата с заданной погрешностью с помощью методов минимизации целевой функции.

Начальное значение $\varepsilon'(f)$, как функций частоты, получают из соотношений ($\varepsilon_n'' = 0$):

$$\begin{aligned} V_{dn}(f) &= -2\pi fl / \arg(S_{21}^d) - 2\pi, \\ \varepsilon_n'(f) &= \left(\frac{v_0}{\dot{V}_{dn}(f)}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{2af}\right)^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Окончательный результат получают минимизацией целевой функции:

$$\begin{aligned} \left[\operatorname{Re}\left(\frac{S_{21}^d}{S_{21}^0}\right) - \operatorname{Re}\left(\frac{S_{21}^a S_{12}^b \exp(-i2\pi fl/\dot{V}_d)}{\exp(-i2\pi fl/V) (1 - S_{22}^a S_{11}^b \exp(-i4\pi fl/\dot{V}_d))}\right) \right]^2 &\Rightarrow 0, \\ \left[\operatorname{Im}\left(\frac{S_{21}^d}{S_{21}^0}\right) - \operatorname{Im}\left(\frac{S_{21}^a S_{12}^b \exp(-i2\pi fl/\dot{V}_d)}{\exp(-i2\pi fl/V) (1 - S_{22}^a S_{11}^b \exp(-i4\pi fl/\dot{V}_d))}\right) \right]^2 &\Rightarrow 0 \end{aligned} \quad (12)$$

в пространстве искомых величин ε' , ε'' .

3. Эксперимент

В работе [1] обсуждается волноводный метод определения коэффициента передачи. Для определения комплексной диэлектрической проницаемости используются функции Mathcad. К сожалению, в работе не приводятся практических результатов, полученных с использованием данного метода.

В литературе известно достаточно большое число работ, в которых обсуждались те или иные аспекты решаемых измерительных задач в нестандартных направляющих системах [2-6]. В настоящей работе исключение влияния коаксиально-волноводных переходов на результаты измерений выполняется LR-методом, являющимся развитием LRT-метода [7].

Для измерения параметров материалов в диапазоне частот 8,5 – 12 ГГц применялся волноводный тракт сечением 23x10 мм с переходами на стандартные коаксиальные разъемы типа SMA. Элементы тракта и измерительная камера показаны на рисунке 2.

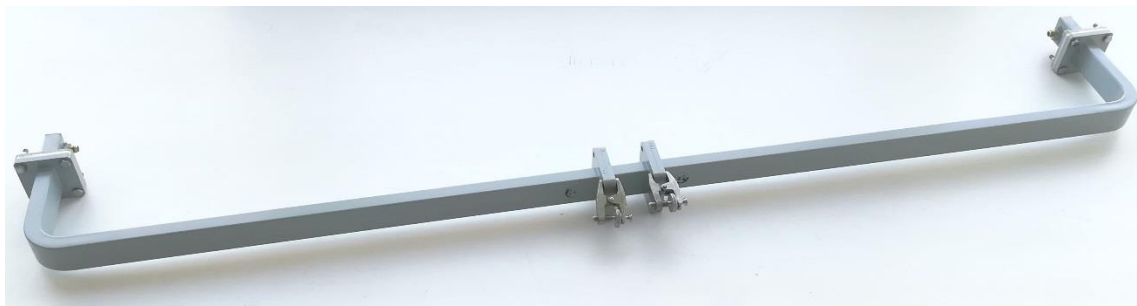


Рисунок 2. Измерительный тракт с сечением волновода 23x10 мм

Образцы и измерительная камера для данного диапазона показаны на рисунке 3.



Рисунок 3. Измерительная камера и образцы материалов для измерений в диапазоне 8,5 – 12 ГГц

В таблице 2 приведены результаты измерений относительной комплексной диэлектрической проницаемости образца материала «фторопласт 4» на разных диапазонах частот и с разным положением образца относительно границ измерительной камеры волновода 23 × 10 мм длиной 40 мм.

Таблица 2. Значения комплексной диэлектрической проницаемости материала «фторопласт 4»

Диапазон частот	Положение образца 1		Положение образца 2	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
8,5 ÷ 12,0 ГГц	1,950483	0,000367	1,945738	0,000367
8,7 ÷ 11,8 ГГц	1,950055	0,000367	1,943926	0,000367
8,5 ÷ 10,0 ГГц	1,886130	0,000367	1,878881	0,000367
10,0 ÷ 12,0 ГГц	1,998789	0,000367	1,996120	0,000367

4. Заключение

Волноводный метод позволяет с высокой точностью определить электромагнитные характеристики материалов, а именно диэлектрическую проницаемость. Влияние положения образца в волноводе полностью исключается за счет измерения отрезка волновода с образцом и без образца. Предлагаемый LR-метод позволяет выполнить калибровку с минимальным комплектом калибровочных мер.

Список литературы

1. Данилин А.А. Упрощенный метод измерения параметров диэлектриков на СВЧ // Сборник статей VII Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», СПб.: Изд-во СПб. ГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, с. 501-504.
2. Михаэль Хибель Основы векторного анализа цепей. Москва, Издательский дом МЭИ, 2009, с. 133 – 152
3. PNA Series Network Analyzers help.- <http://na.support.keysight.com/pna/help/latest/help.htm>.
4. Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers.-[http://anlge.umd.edu//Agilent Advanced VNA Calibration.pdf](http://anlge.umd.edu//Agilent%20Advanced%20VNA%20Calibration.pdf).
5. Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers. Application Note 5989-4804EN // Keysight Technologies, 2016. P. 42.
6. В. Казарновский, А. Крылов Методы измерения параметров коаксиально-волноводных переходов и узлов с нестандартным сечением. Электроника. Наука, технология бизнес 2016, №8, с 82-87.
7. Лавричев О.В., Никулин С.М. LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах // Журнал Датчики и системы. – М.: Изд-во Сенсидат-Плюс 2017, №8-9 с. 39-44.