

Данилин А.А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Упрощенный метод измерения параметров диэлектриков на СВЧ

Представлена методика измерения и обработки опытных данных волноводного способа измерения параметров диэлектриков на СВЧ. Рассмотрены особенности использования метода в лабораторном практикуме по дисциплине «Измерения на СВЧ»

Ключевые слова: Микроволновые измерения, СВЧ техника, измерительные приборы СВЧ, измерение параметров диэлектриков на СВЧ.

Для измерения параметров диэлектриков широко используются т.н. "волноводные методы», основанные на исследовании образца диэлектрика, размещенного в линии передачи (коаксиальной или волноводной). Эти методы в литературе получили название (в том числе и для коаксиальных ИЯ). Измерению подлежат элементы матрицы рассеяния образца исследуемого диэлектрика, помещенного в измерительную ячейку – отрезок волновода или коаксиальной линии. В различных вариантах метода используют опытное определение отдельных параметров диэлектрической неоднородности (фазового сдвига, коэффициента отражения и пр.). Искомые значения затем определяют расчетным путем. К достоинствам волноводных методов следует отнести широкий диапазон частот, простоту реализации, несложность измерительной ячейки, возможность применения стандартного оборудования и известных методик измерения. Это позволяет использовать волноводный метод в лабораторном практикуме по дисциплине «Измерения на СВЧ».

С целью упрощения метода в лабораторной работе используется измерение только коэффициента передачи измерительной ячейки. В лабораторную установку входят измеритель разности фаз ФК2-18 и внешний СВЧ генератор с диапазоном частот, соответствующим рабочему диапазону волновода 23 x 10 мм (8 -12 ГГц). В состав макета входит комплект коаксиально-волноводных переходов и измерительная ячейка с исследуемым диэлектриком. Для фиксации волноводов используются направляющие штыри в переходах. Измерительная ячейка представляет собой толстый волноводный фланец – держатель диэлектрического образца. Исследуемый материал полностью заполняет сечение волновода.

Общий вид измерительного макета представлен на рис. 1.



Рис. 1. Измерительная ячейка с коаксиально-волноводными переходами

Эквивалентная схема измерительной ячейки представляет собой соединение трех отрезков прямоугольного волновода. Центральный отрезок длиной L заполнен диэлектриком, два других - воздухом. Расчетная модель отрезка линии с диэлектриком включает три каскадно включенных четырехполюсника. Это стыки линий с разными волновыми сопротивлениями, включенными навстречу друг другу, и отрезок линии передачи с диэлектриком. Граф расчетной модели представлен на рис.2

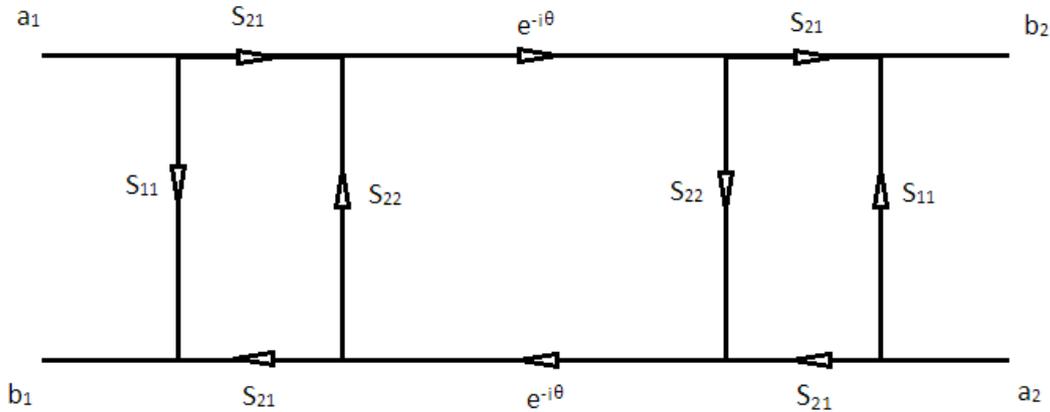


Рис. 2. Направленный граф исследуемого образца диэлектрика

Здесь S_{ij} - элементы матрицы рассеяния стыков пустого и заполненного волновода, коэффициент передачи отрезка волновода с диэлектриком $e^{-i\theta} = e^{-i\lambda L}$ отражает влияние электрической длины образца L на распространение электромагнитной волны в нем.

$$\gamma = \beta - i\alpha, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}, \quad \alpha = \frac{\pi\varepsilon''}{\lambda \sqrt{\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

$$S_{11} = \frac{n-1}{n+1}, \quad S_{22} = -S_{11}, \quad S_{21} = \frac{2\sqrt{n}}{n+1}, \quad n = \frac{2\pi/\lambda}{\beta}$$

С помощью правила некасающегося контура получим уравнение для коэффициента передачи измерительной ячейки:

$$\hat{S}_{21} = \frac{S_{21}^2 \cdot e^{-i\theta}}{1 - S_{22}^2 \cdot e^{-2i\theta}}$$

После измерения модуля и аргумента коэффициента передачи, необходимо решить достаточно сложную обратную задачу – найти комплексную диэлектрическую проницаемость исследуемого образца. Для этого используется программный калькулятор, реализованный в пакете Mathcad. Калькулятор по полученным опытным данным (по изменениям ослабления ΔA и фазы коэффициента передачи $\Delta \varphi$ при помещении диэлектрика в ячейку) позволяет найти диэлектрическую проницаемость исследуемого материала и его фактор потерь. Входными данными являются экспериментально полученные значения модуля и аргумента коэффициента передачи, сечение волновода, длина исследуемого образца, частота, на которой был произведен эксперимент. Выходным параметром является комплексная диэлектрическая проницаемость (рис.6).

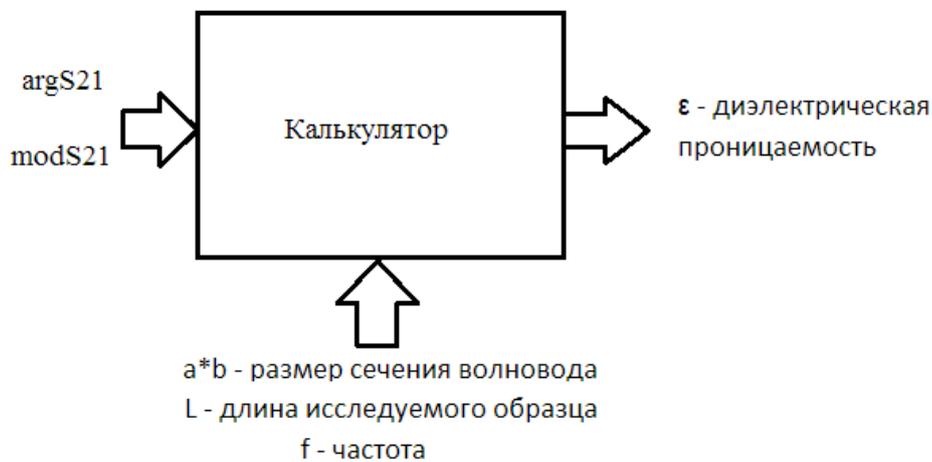


Рис. 3. Общий принцип работы калькулятора

Для решения этой задачи используются встроенные в Mathcad функции решения нелинейных уравнений Find и Minerr. Для диэлектриков с малыми потерями удобно использовать двухступенчатый алгоритм поиска решения. На первом шаге вводятся экспериментально полученные вариации фазового сдвига и ослабления, а также примерное значение диэлектрической проницаемости и нулевой фактор потерь. Производится поиск приближенного значения диэлектрической проницаемости. На втором шаге используется поиск минимума нелинейного уравнения по двум координатам с помощью функции Minerr. В качестве приближения используется значение диэлектрической проницаемости, полученное на предыдущем этапе. Успешность поиска результата во многом зависит от удачного начального приближения. Для диэлектриков с большими потерями первый шаг может не давать разумного приближения, поэтому его можно опустить.

В качестве проверки полученных решений используется программа моделирования измерительной ячейки в пакете AWR Design Environment. Для начала выбираем три одинаковых отрезка волновода и соединяем их между собой, в настройках каждого элемента указываем необходимое сечение волновода и тип волны, проходящей в системе TE10. В центральном элементе задаем полученную ранее в калькуляторе диэлектрическую проницаемость и длину образца. Остальные волноводные части представляем, как отрезки волновода, заполненные воздухом с длиной, равной нулю. Для подключения портов используем стандартные идеальные модели коаксиально-волноводных переходов с портами по 50 Ом (рис. 4).

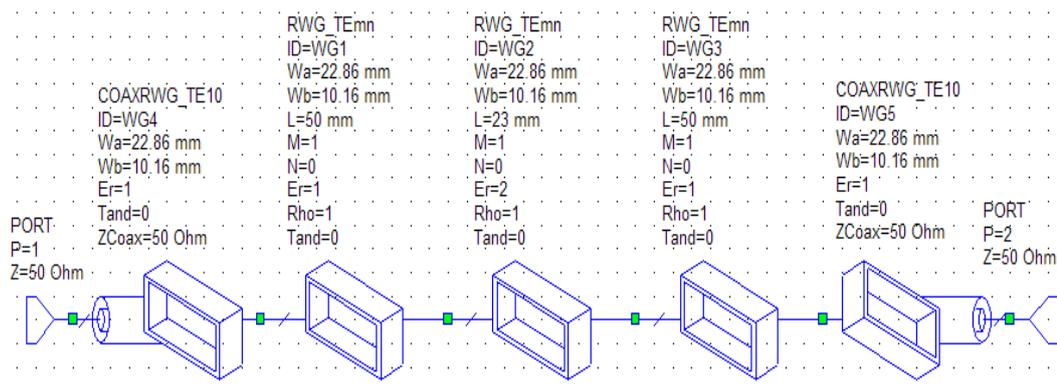


Рис. 4. AWR - модель измерительной волноводной ячейки

В результате моделирования получаем зависимости аргумента и модуля коэффициента передачи от частоты (рис. 5).

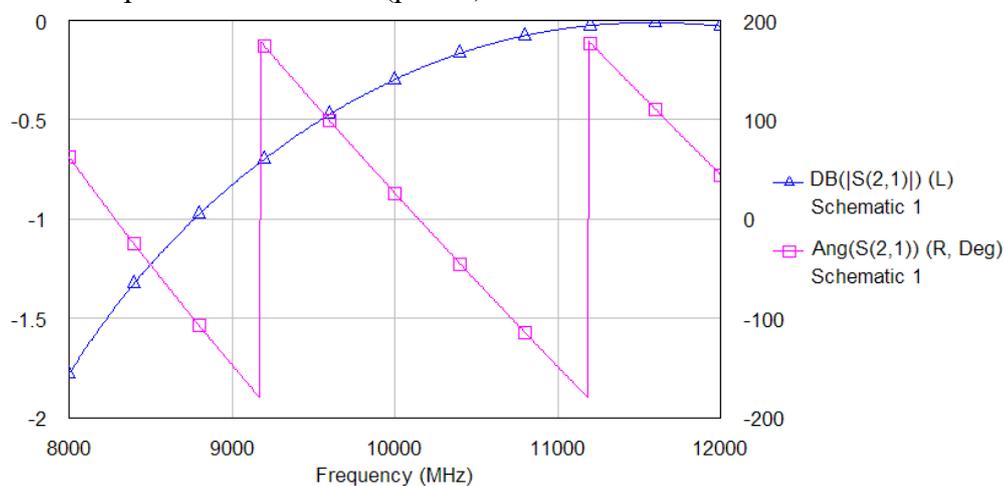


Рис. 5. Результаты расчета коэффициента передачи волноводной ячейки

Данная модель позволяет сравнить расчеты в Mathcad-калькуляторе с решением MW Office и уточнить полученные результаты.

Библиографический список

1. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с
2. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1963 г., 404 с. с илл.
3. Keysight Technologies. "Основы измерения диэлектрических свойств материалов" Заметки по применению.