## Определение параметров диэлектриков в диапазоне свч на основе экспериментальных данных и параметрической оптимизации

### В.И. Алексеенков, Е.А. Богомолова, В.И. Васильев, А.В. Галдецкий

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: Предложена методика измерений диэлектрических и магнитных свойств материалов волноводным методом, в которой погрешность, связанная с наличием щелей между образцом и стенкой волновода, устраняется путем сопоставления с результатами численного 3D модели, диэлектрические анализа характеристики которой чтобы добиться наилучшего оптимизируются так, совпадения расчетных и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** диэлектрическая и магнитная проницаемости, тангенс электрических и магнитных потерь, волноводный метод измерения

### 1. Введение

Определение диэлектрических свойств поглощающих материалов является важной задачей в СВЧ электронике. Эта информация является критической при разработке многих СВЧ устройств. Проблема измерения не является новой, предложено большое число методов для измерения диэлектрических и магнитных свойств вещества на СВЧ [1]. Однако это многообразие говорит о том, что данная задача до сих пор не решена.

В данной работе стояла задача определить четыре характеристики поглощающей керамики, используя волноводный метод измерения. Очевидно, что для определения четырех параметров (ε', ε", μ', μ") необходимо измерить четыре величины.

Волноводный метод позволяет производить измерения различных материалов (в том числе с большим поглощением) в весьма широком диапазоне длин волн (от 10 до 1-0.5 см). Суть метода заключается в том, что измеряются S-параметры отрезка волновода с помещенным туда образцом, и в результате обработки этих данных определяют параметры материала (Рисунок 1) [1, 2].



Рисунок 1. 3D-модель измерительной линии.

При этом простейшая аналитическая формула NRW (Nicolson-Ross-Weir) [2, 3] может давать значительную ошибку из-за влияния малоконтролируемого зазора между измеряемым образцом и стенкой волновода. Для решения данной проблемы

была предложена формула, корректирующая алгоритм NRW и учитывающая зазор между образцом и волноводом [4]:

$$\varepsilon_{\rm of} = \frac{\varepsilon_{NRW}(b - \Delta b)}{b - \Delta b \varepsilon_{NRW}} \tag{1}$$

где  $\varepsilon_{06}$  –диэлектрическая проницаемость материала образца,  $\varepsilon_{NRW}$  –диэлектрическая проницаемость, вычисленная из измерений с помощью алгоритма NRW, b – высота волновода,  $\Delta b$  – высота зазора.

Однако наш анализ показал, что алгоритм NRW, скорректированный формулой (1), дает относительную ошибку  $\varepsilon$  не более 4% лишь для диэлектриков со значением  $\varepsilon \leq 5$ , а при  $\varepsilon \geq 20$  относительная ошибка становится очень большой, что связано с искажением поля вблизи концов образца. На рисунке 2 представлены диэлектрические и магнитные свойства трех эталонных образцов с  $\varepsilon = 5$ , 20, 80, длиной образца 3 мм и высотой зазора между ним и узкой стенкой волновода  $\Delta b = 131$  мкм. Очевидно, что при  $\varepsilon = 80$  указанный алгоритм дает лишь качественную оценку параметров материала, и чем больше высота зазора  $\Delta b$ , тем больше становится относительная ошибка. Таким образом, данный метод определения параметров материала имеет ограничения. В работе исследуемые диэлектрики имеют высокую диэлектрическую проницаемость и большие потери, поэтому для определения их электромагнитных характеристик в широком диапазоне частот требуется разработать новый метод измерения, свободный от указанных выше недостатков.

# 2. Определение параметров материала путем сравнения измерений с расчетными характеристиками модели

Предлагаемая методика измерения сводится к определению диэлектрических и магнитных свойств материала путем измерений модуля и фазы S<sub>11</sub>, S<sub>21</sub> отрезка волновода с образцом (рисунок 1) и подгонки к ним параметров расчетной 3D модели.

Описание методики:

- Точное измерение размеров исследуемого образца
- Измерение S-параметров волноводной вставки с исследуемым образцом
- Создание модели измерительной ячейки в программе электродинамического моделирования с параметризованными частотнозависимыми значениями ε', ε", μ', μ" (рисунок 1)
- Подгонка S-параметров модели к измеренным данным путем процедуры оптимизации с варьированием в полосе частот значений ε', ε", μ', μ".

На рисунках 3-4 представлены модули коэффициентов отражения и передачи образцов с поглощающими керамиками АН-МКХ2 и ПКМ-35Ж в диапазоне частот 8-12 ГГц, а на рисунках 5-6 электродинамические характеристики данных материалов соответственно, определенные по новой методике.

Материал АН-МКХ2 является немагнитным материалом. Наличие незначительных магнитных потерь связано с тем, что при помоле шихты в мельнице были использованы стальные шары.

Материал ПКМ-35Ж по составу является магнитным материалом, что и подтвердили измерения. Определение электродинамических параметров данного материала показало, что существует неравномерность характеристик по пластине, что связано с перепадом температур в печи при спекании.

Новая методика определения характеристик материалов может быть использована для быстрой отработки технологического процесса с целью получения необходимых параметров материала для СВЧ узла.



**Рисунок 2.** Диэлектрические и магнитные характеристики, рассчитанные с помощью скорректированного и нескорректированного алгоритма NRW для трех эталонных образцов материала с длиной 3 мм, зазором 161 мкм,  $\mu = 1$ , tg $\delta_{\epsilon} = 0.15$ , tg $\delta_{\mu} = 0.08$  и  $\epsilon = 5$  (A),  $\epsilon = 20$  (B),  $\epsilon = 80$  (B).



**Рисунок 3.** Модуль коэффициентов отражения и передачи образцов материала АН-МКХ2: сплошные кривые – расчетные, штрих-пунктирные – измеренные.



**Рисунок 4.** Модуль коэффициентов отражения и передачи образцов материала ПКМ-35Ж: красная и зеленая кривые – расчетные, синяя и оранжевая кривые – измеренные.



**Рисунок 5.** Электромагнитные параметры керамики АН-МКХ2: А) диэлектрическая проницаемость; Б) тангенс электрических потерь; В) магнитная проницаемость; Г) тангенс магнитных потерь.



**Рисунок 6.** Электромагнитные параметры керамики ПКМ-35Ж: А) диэлектрическая проницаемость; Б) тангенс электрических потерь; В) магнитная проницаемость; Г) тангенс магнитных потерь.

Моделирование показало, что при значениях диэлектрической проницаемости образца в диапазоне 20-25, процедура оптимизации сводится к истинному значению диэлектрических параметров независимо от стартовых значений этих параметров. Оптимизация проводилась встроенным методом Nelder Mead Simplex Algorithm в программе CST Studio.

### 3. Заключение

Разработанный метод измерения электродинамических характеристик материалов с большой диэлектрической проницаемостью позволяет получить полную информацию о материале в широкой полосе частот с относительной погрешностью 2% независимо от величины зазора (при условии, что зазор точно измерен).

#### Список литературы

- Chen L.F. Microwave electronics. Measurements and materials characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan — John Wiley & Sons, 2004. — 552 p.
- Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of intrinsic properties of materials by time domain techniques / A.M. Nicolson, G.F. Ross // Trans. On Instrumentation and Measurements — 1970 — Vol. 19 (4). — P. 377-382
- 3. Weir W. B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies / W. B. Weir // Proceedings of the IEEE 1974 Vol. 62 (1). P. 33–36.
- 4. Musil, J. and Zacek, F. Microwave Measurements of Complex Permittivity by Free Space Methods and their Applications / J. Musil and F. Zacek Elsevier, Amsterdam, 1986.