

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

В.И. Алексеев, 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 анализа 3D модели, диэлектрические характеристики которой оптимизируются так, чтобы добиться наилучшего 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].

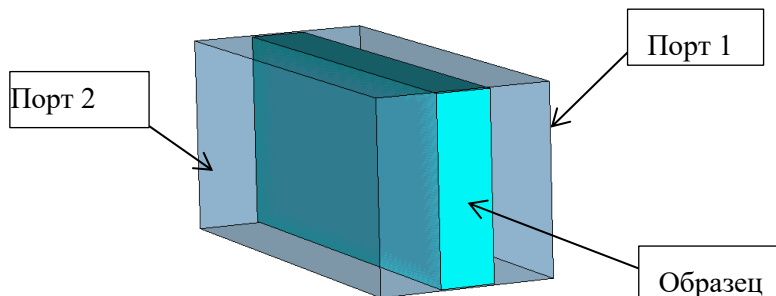


Рисунок 1. 3D-модель измерительной линии.

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]:

$$\varepsilon_{об} = \frac{\varepsilon_{NRW}(b-\Delta b)}{b-\Delta b\varepsilon_{NRW}} \quad (1)$$

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

Однако наш анализ показал, что алгоритм NRW, скорректированный формулой (1), дает относительную ошибку ε 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 Δb , 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_{11} , S_{21} 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.

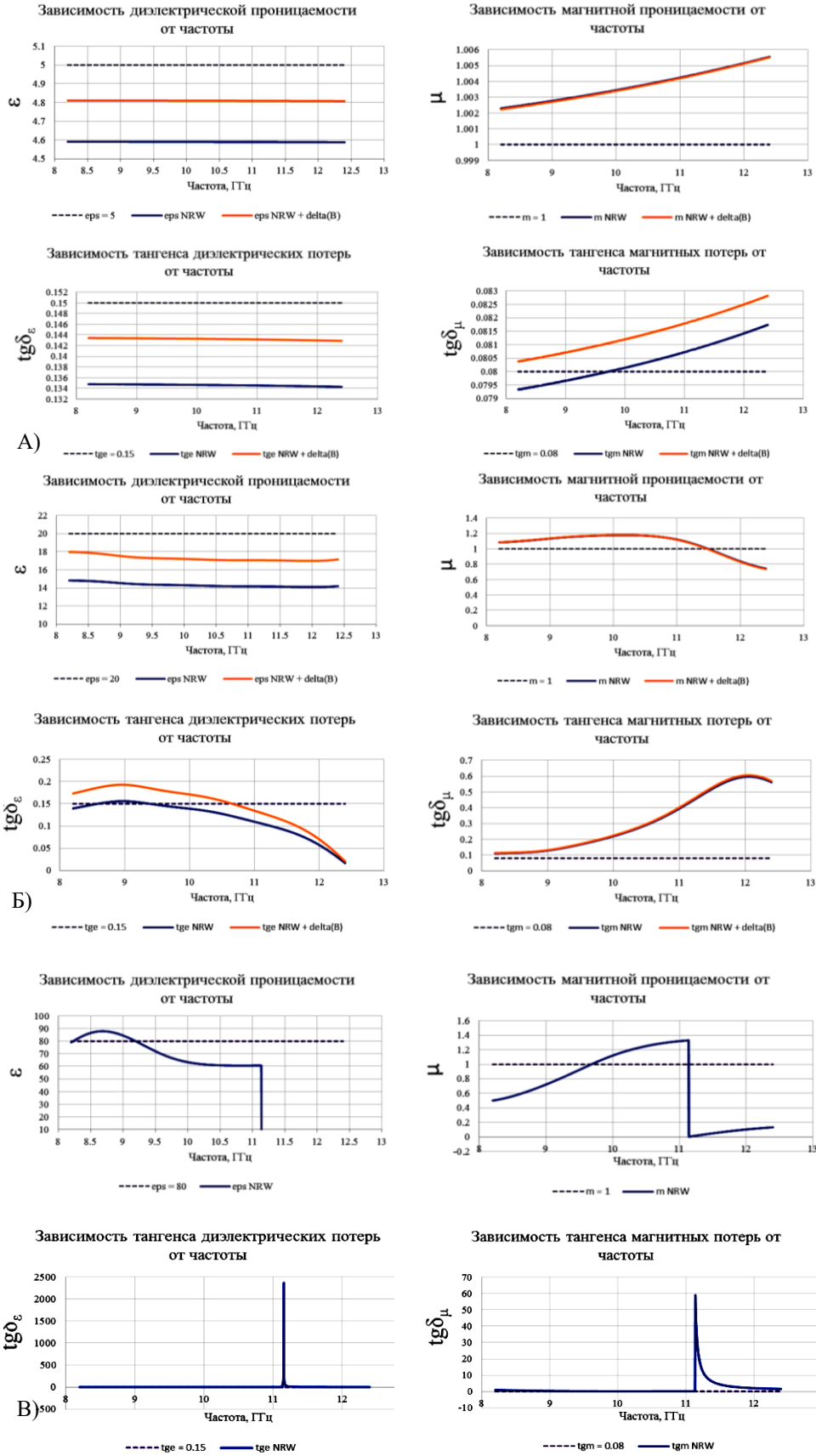


Рисунок 2. Диэлектрические и магнитные характеристики, рассчитанные с помощью скорректированного и нескорректированного алгоритма NRW для трех эталонных образцов материала с длиной 3 мм, зазором 161 мкм, $\mu = 1$, $\text{tg} \delta_\epsilon = 0.15$, $\text{tg} \delta_\mu = 0.08$ и $\epsilon = 5$ (А),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

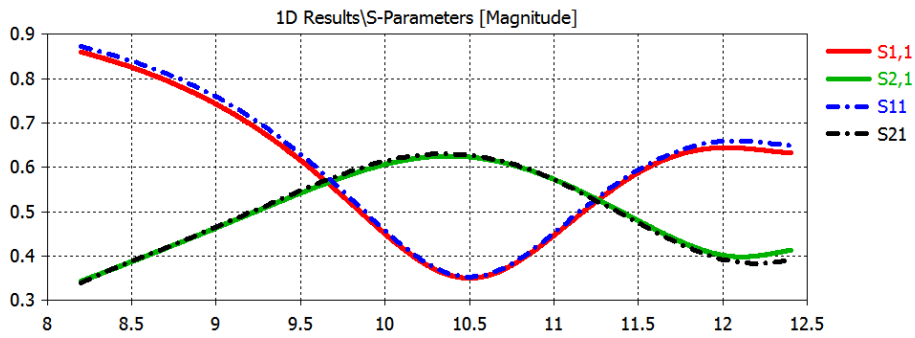


Рисунок 3. Модуль коэффициентов отражения и передачи образцов материала АН-МКХ2: сплошные кривые – расчетные, штрих-пунктирные – измеренные.

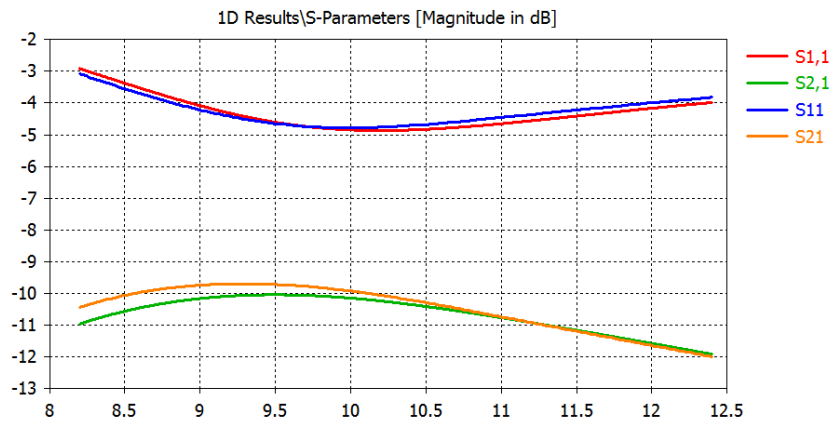


Рисунок 4. Модуль коэффициентов отражения и передачи образцов материала ПКМ-35Ж: красная и зеленая кривые – расчетные, синяя и оранжевая кривые – измеренные.

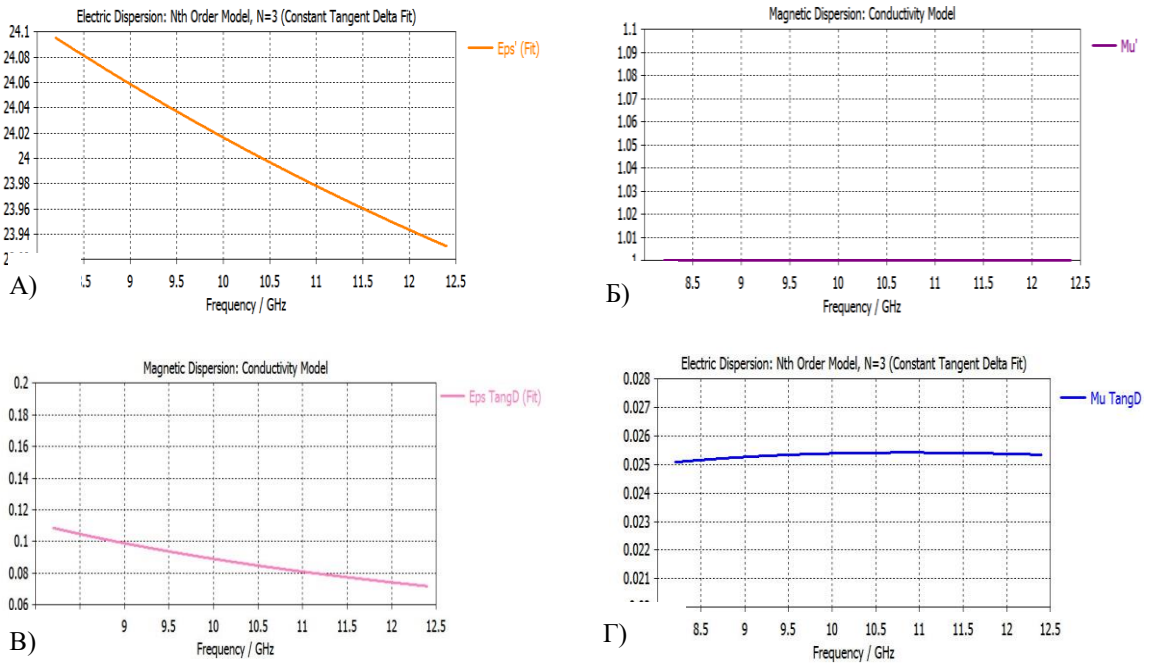


Рисунок 5. Электромагнитные параметры керамики АН-МКХ2: А) диэлектрическая проницаемость; Б) тангенс электрических потерь; В) магнитная проницаемость; Г) тангенс магнитных потерь.

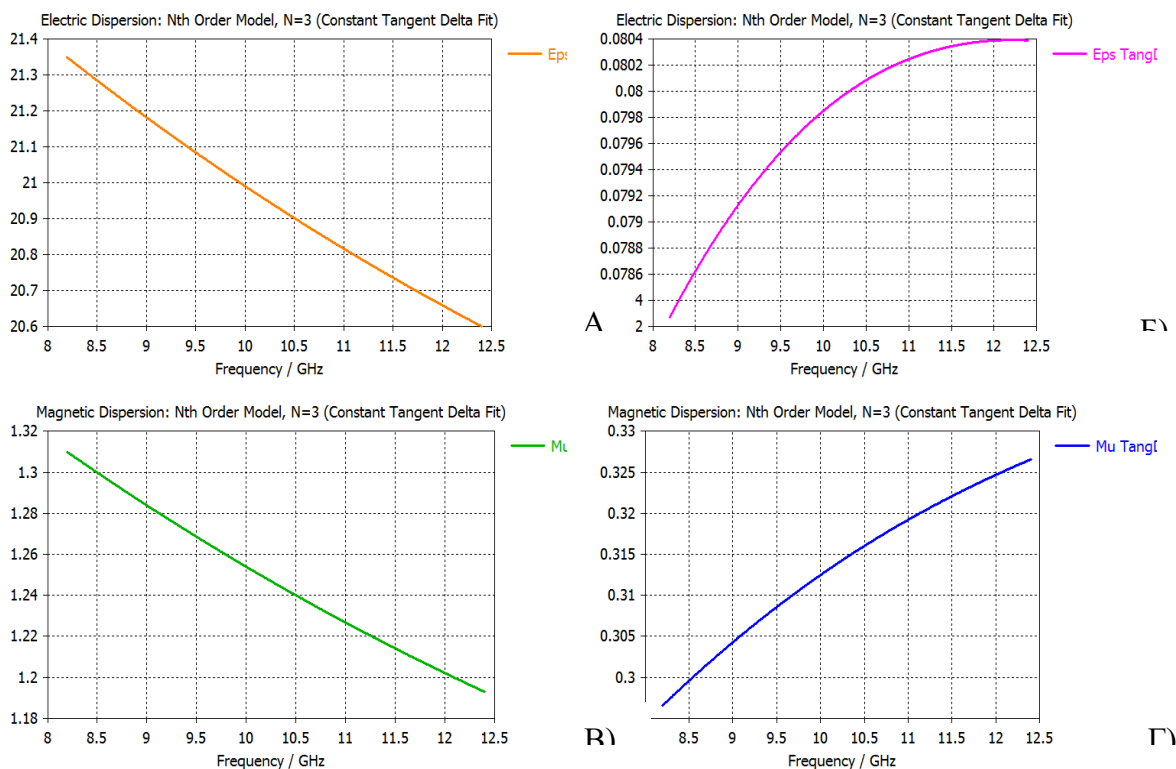


Рисунок 6. Электромагнитные параметры керамики ПКМ-35Ж: А) диэлектрическая проницаемость; Б) тангенс электрических потерь; В) магнитная проницаемость; Г) тангенс магнитных потерь.

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

1. 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.
2. 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.