

# Методика измерения диэлектрических свойств материалов на частоте 2.45 ГГц

В.А. Иванов<sup>1,2</sup>, Д. Шеримов<sup>1,2</sup>, И.А. Токарев<sup>2</sup>, В.А. Репин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>ООО «Технологические Системы и Комплексы»

**Аннотация:** Методика основана на измерениях только коэффициента отражения  $S_{11}$  в коаксиальном тракте, соединенном через коаксиально-волноводный переход (КВП) с волноводной короткозамкнутой измерительной камерой. В камеру помещается образец произвольной (но известной) формы. Сопоставление экспериментальных данных с расчетными проводится в программе CST MWS путем параметрической оптимизации с вариацией  $\epsilon_r$  и  $\tan\delta$  исследуемого образца. При этом сопоставлении используется 3D модель тракта и измерительной камеры. Эта модель формируется заданием размеров КВП и камеры, параметрической коррекцией этих размеров с использованием измерений  $S_{11}$  на пустую камеру. Целевая функция – соответствие измеренных и расчетных значений  $S_{11}$  в полосе частот. Методика прошла успешную апробацию при измерении материалов с диэлектрической проницаемостью от 1.03 до 80 и тангенсом угла диэлектрических потерь от 0.001 в диапазоне 2.2-2.7 ГГц.

**Ключевые слова:** диэлектрические параметры, диэлектрическая проницаемость, коэффициент потерь, методика измерения, векторный анализатор цепей.,

## 1. Введение

В данной работе рассматривается методика измерения диэлектрических параметров материалов. В настоящее время существует множество методов [1-5] для измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, но каждый метод имеет ряд своих недостатков и ограничений. Главным недостатком существующих методов измерения диэлектрических параметров является отсутствие универсального метода, с помощью которого была бы возможность проводить измерения различных материалов, независимо от их агрегатного состояния, будь то жидкость или твердое вещество. Также многие методы требуют предварительной задания формы исследуемого материала. Не всегда на практике это удается сделать, так как материал может быть дорогостоящим или тяжело поддаваться механической обработке.

Основой для разработанной методики служит волноводный метод измерения диэлектрических параметров веществ. Выбор такого метода связан с возможностью измерения различных видов материалов (с малыми и с большими потерями) и с возможностью проведения измерений в широком частотном диапазоне [1,2]. В данной работе исследования проводились в ISM диапазоне на частотах вблизи 2.45 ГГц.

Основное отличие предлагаемого подхода от похожей методики [4] заключается в отсутствии необходимости использования 2-го порта. Отражение волны от короткозамкнутого конца волновода обеспечивает «внутренний» естественный порт, который влияет на итоговую величину  $S_{11}$ .

## 2. Суть методики

1. Калибровка векторного анализатора цепей (ВАЦ) в плоскости подключения КВП.
2. Создание 3D модели измерительного тракта и ее верификация с помощью сравнения рассчитанных в CST и измеренных параметров  $S_{11}$  в полосе частот на пустой камере.
3. Точное измерение формы и соответствующих размеров исследуемого образца

(или формы емкости для жидких продуктов). Установка образца в измерительную камеру.

4. Измерение  $S_{11}$  с исследуемым образцом в плоскости калибровки ВАЦ.

5. Верификация параметров  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  в программе CST для получения соответствия S-параметров 3D модели и измеренных данных.

### 3. Схема измерений

Схема измерений представлена на рисунке 1. В нее входят: ВАЦ, коаксиальный кабель, КВП и короткозамкнутый волновод 90x45 мм. Исследуемый образец помещается через отсоединяемую КЗ заглушку.

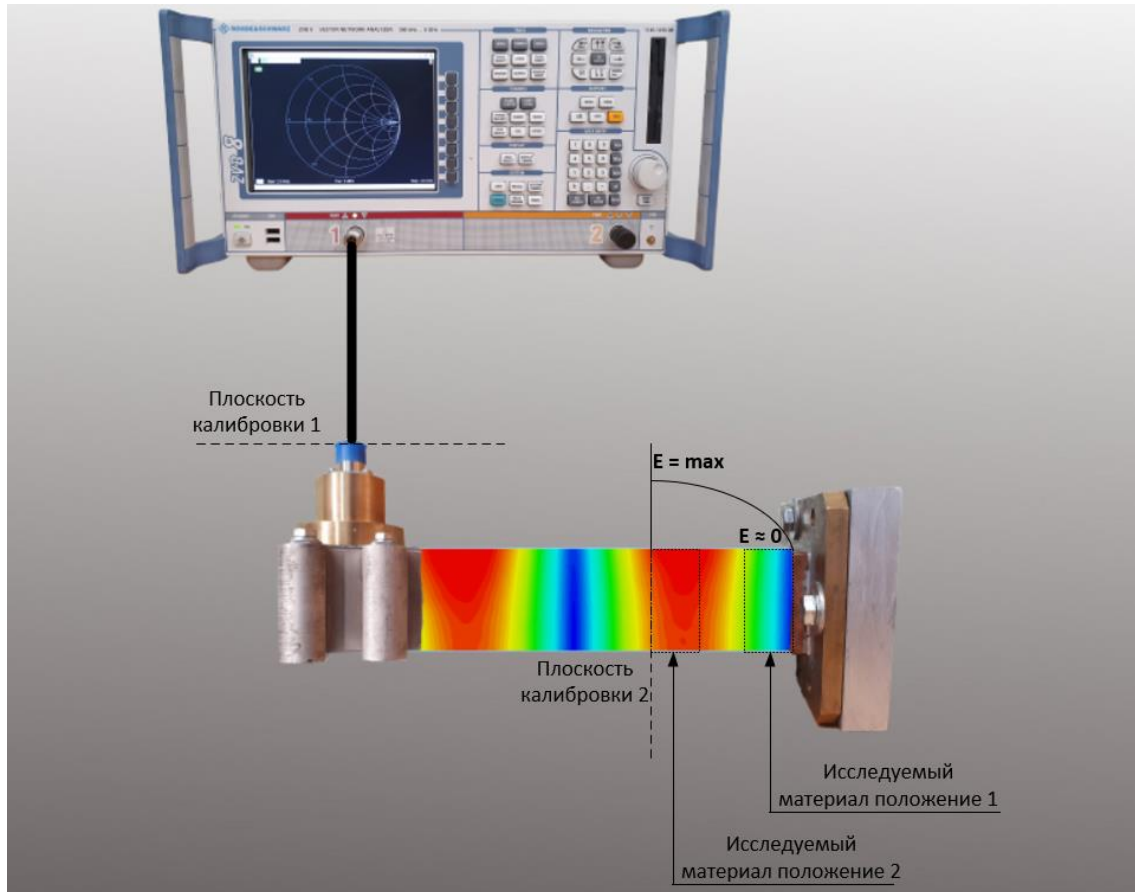


Рисунок 1. Схема измерений

– Калибровка ВАЦ в плоскости подключения КВП.

Перед началом измерений проводится стандартная калибровка ВАЦ относительно плоскости 1 с помощью 3-х калибровочных нагрузок из поставляемых производителем прибора: КЗ (короткое замыкание), ХХ (холостой ход) и СН (согласованная нагрузка).

– Создание 3D модели измерительного тракта и камеры и ее верификация по измерениям на пустую измерительную камеру.

В качестве КВП использовался специальный «магнетронный» зонд, размеры и форма которого, совпадали с таковыми для антенны типового магнетрона бытовой СВЧ печи. Этот зонд и его 3D модель были разработаны в лаборатории фирмы ООО «Технологические Системы и Комплексы». Измерительная камера – волновод 90x45 мм, короткозамкнутый с обеих концов (см. рис. 2 и рис.3).

– Точное измерение формы и соответствующих размеров исследуемого образца.

Такие измерения имеют важное значение, когда проводится исследование

образцов с относительной диэлектрической постоянной более 5-10. Особенно это



Рисунок 2. Измерительная камера

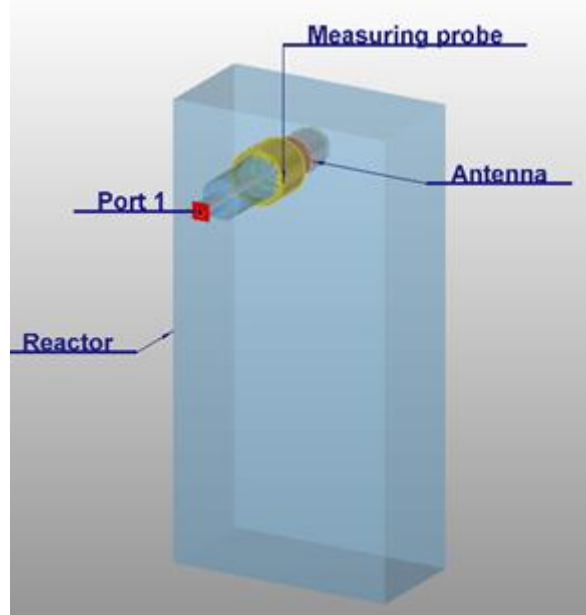


Рисунок 3. Модель измерительной камеры

проявляется на измерениях воды или водных растворов.

Расположение исследуемого материала в измерительной камере может быть произвольным. Для увеличения чувствительности измерений и уменьшения погрешности естественно располагать образец в районе максимума электрического поля (на расстоянии  $\lambda/4$  от КЗ).

– Измерение  $S_{11}$  в плоскости калибровки ВАЦ с исследуемым образцом в измерительной камере. Данные с ВАЦ экспортируются в формате Touchstone и импортируются в CST.

– Верификация параметров  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  в программе CST для получения соответствия S-параметров 3D модели и измеренных данных.

#### 4. Экспериментальные исследования

В ходе исследования, были проведены серии экспериментальных измерений диэлектрических параметров различных материалов, результаты которых использовались для верификации полученных данных в том числе. Сходимость S-параметров, полученных на ВАЦ и промоделированных в CST, представлена с помощью диаграммы Смита на рисунке 4, где синяя кривая – S-параметры с ВАЦ, а розовая – с CST. В качестве тестируемого материала использовалась керамика ЗАО «ТЕСТПРИБОР». Значения  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$  в таблице относятся к алюмооксидной керамике  $\text{Al}_2\text{O}_3$  марки 22ХС.

Таблица 1. Значения  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$  алюмооксидной керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Марка керамики	$\epsilon_r$ при 20 <sup>0</sup> С на частоте		$\text{tg}\delta$ при 20 <sup>0</sup> С на частоте	
	10 <sup>6</sup> Гц	3 x 10 <sup>10</sup> Гц	10 <sup>6</sup> Гц	3 x 10 <sup>9</sup> Гц
22ХС/ВК94-1	9.5	8.6	6 x 10 <sup>-4</sup>	15 x 10 <sup>-4</sup>

С помощью предлагаемой методики в частотном диапазоне 2.2 – 2.7 ГГц были получены следующие значения:

$$\epsilon_r = 8.7 \text{ и } \text{tg}\delta = 0.0035$$

Полученные результаты близки по значениям к известным величинам и находятся в допустимых пределах погрешности.

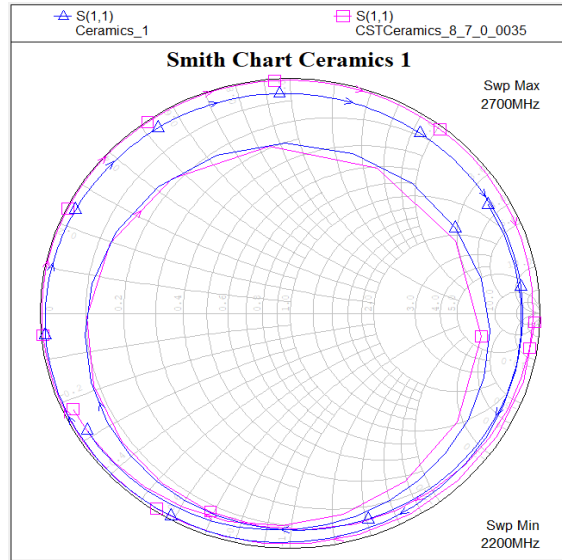


Рисунок 4. Годографы  $S_{11}$ : расчет и измерения.

С помощью данной методики были проведены измерения диэлектрических параметров различных материалов. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сводная таблица результатов диэлектрических параметров материалов при комнатной температуре и на частоте 2.45 ГГц

Таблица 2. Сводная таблица результатов диэлектрических параметров материалов при комнатной температуре и на частоте 2.45 ГГц

Материал	$\epsilon_r$	$tg\delta$
Экструзионный пенополистирол	1.03	0.0008
Минеральная изоляция	1.20	0.0260
Вспученный вермикулит	1.25	0.0250
Лигнин	1.40	0.0840
Теплоизол	1.44	0.0010
Древесные пеллеты	1.70	0.0455
Топливные брикеты	2.10	0.0665
Вермикулит	2.30	0.0900
Биочар	2.40	0.1000
Пористый карбид кремния SiC	3.00	0.0700
Термостойкая ткань	3.40	0.0542
Гранулы МТВ	3.70	0.0105
Вспененный свекольный снек	4.00	0.0730
Асфальт-бетонная смесь	6.00	0.0325
Алюмооксидная керамика $Al_2O_3$	8.70	0.0035
Изопропиловый спирт	17.30	0.0300
Вода	80.00	0.3000

## 5. Заключение

Разработанная методика позволяет получить значения диэлектрических параметров веществ со знанием только лишь коэффициента отражения  $S_{11}$ . В отличие от существующих методов измерения диэлектрических параметров веществ, есть

возможность ставить тестируемые образцы известной формы в различные места измерительной камеры. Предложенный подход может быть адаптирован для исследований зависимости диэлектрических параметров от температуры.

#### 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. Yaw K. C. Measurement of dielectric material properties //Application Note. Rohde & Schwarz. – 2012. – P. 35.
4. Алексеенков В. И. и др. Определение параметров диэлектриков в диапазоне СВЧ на основе экспериментальных данных и параметрической оптимизации //Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – №. 1. – С. 164-168.
5. Григорьев А. Д. НОВЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2018. – №. 5.