

*Алексеев В.И., Галдецкий А.В.,  
Васильев В.И., Потапова Т.И.  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

## Измерение параметров ферроэпоксидной керамики на СВЧ

*Представлены результаты измерения ферроэпоксидной керамики в коаксиальном тракте и предложены формулы для относительной магнитной и диэлектрической проницаемости и тангенса магнитных потерь её на СВЧ. Выбран необходимый способ измерения и оптимизации измеренных параметров для получения достоверных результатов.*

**Ключевые слова:** ферроэпоксидная керамика, диэлектрическая и магнитная проницаемость, измерения в коаксиальном тракте.

### Введение.

Полное измерение 4-х параметров – диэлектрической и магнитной проницаемости, тангенса диэлектрических и магнитных потерь в диапазоне частот является достаточно сложной задачей, когда магнитные потери значительно больше диэлектрических. Известно множество работ по измерению параметров диэлектриков на СВЧ [1-4]. Отдельно диэлектрические или магнитные свойства можно измерять на одной частоте с помощью резонатора [2], [3]. Нами предложен метод измерения всех 4-х характеристик магнитодиэлектриков в диапазоне частот.

### 1. Экспериментальная установка.

Для измерения параметров ферроэпоксидной керамики использовался стенд на основе векторного анализатора цепей Agilent PNA-L N5230C (ВАЦ), калибровочного набора N типа 85054D и измерительного приспособления (ИП) – воздушного коаксиального кабеля сечением 7/3.04 мм рис. 1 .

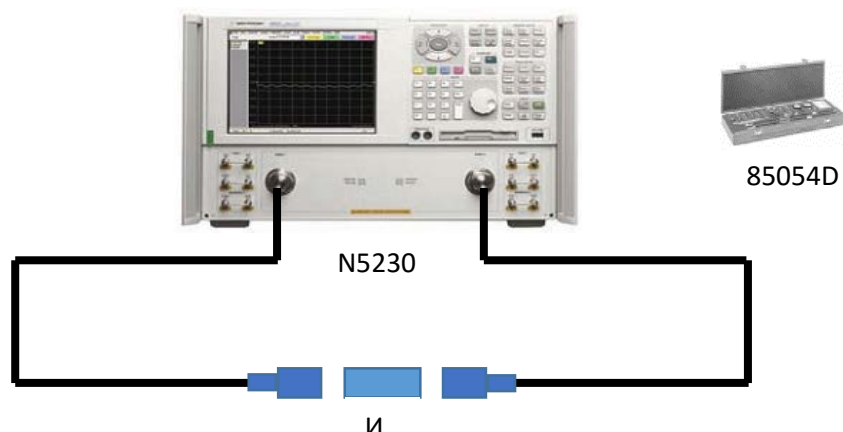


Рис. 1. Экспериментальная установка.

После калибровки анализатора от 0.2 до 10 ГГц в тракте 7/3,04 мм было проведено измерение S-параметров пустого ИП и была получена его эквивалентная схема. Измеряемый образец ферроэпоксида вставлен в ИП и проведено измерение его S-параметров.

## 2. Теоретическая модель устройства.

Для учета магнитных и электрических потерь использована модель на основе телеграфных уравнений. Погонное сопротивление  $R$  в металле ИП рассчитывалось с учетом скин-эффекта по формуле 1.

$$R = q * 4.18 * 10^{-8} * \sqrt{f} * \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \quad (1)$$

Где  $a$  и  $b$  внешний и внутренний радиус коаксиальной линии в м,  $f$  частота в Гц а  $q$  - коэффициент, определяющий отношение удельного сопротивления металла к удельному сопротивлению меди.

Волновое сопротивление коаксиальной линии, учитывающее магнитные и диэлектрические потери определяется уравнением 2:

$$Z = \sqrt{\frac{R + i\omega L_0 * \mu(1 - itg\delta\mu)}{G + i\omega C_0 * \varepsilon(1 - itg\delta\varepsilon)}} \quad (2)$$

Здесь погонная индуктивность  $L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$

погонная ёмкость  $C_0 = 2\pi\varepsilon_0 \ln \frac{b}{a}$  воздушного коаксиала;

$\mu_0$ - магнитная проницаемость вакуума;  $\varepsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость;  $tg\delta\mu$  - тангенс угла магнитных потерь;

$\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость;  $tg\delta\varepsilon$  - тангенс угла диэлектрических потерь. Проводимость воздуха  $G=0$ .

Постоянная распространения

$$\gamma = \sqrt{(R + i\omega L_0 * \mu(1 - itg\delta\mu)) * (G + i\omega C_0 * \varepsilon(1 - itg\delta\varepsilon))}$$

Таким образом, мы можем рассчитать параметры матрицы рассеяния [1]:

$$S_{11} = \frac{(Z^2 - Z_0^2) * Sh(\gamma l)}{2 * Z * Z_0 * Ch(\gamma l) + (Z^2 + Z_0^2) * Sh(\gamma l)}$$

$$S_{21} = \frac{2Z * Z_0}{2 * Z * Z_0 * Ch(\gamma l) + (Z^2 + Z_0^2) * Sh(\gamma l)}$$

Где  $Z_0 = 50$  Ом волновое сопротивление подводящего кабеля.

$l$  – длина измеряемого образца. В нашем случае ввиду симметричности конструкции  $S_{11}=S_{22}$  и  $S_{21}=S_{12}$ .

## 3. Метод измерения.

Основным недостатком существующих устройств для измерения параметров диэлектриков является их слабая приспособленность для измерения материалов с высокими магнитными и малыми диэлектрическими потерями, какими являются феррооксидные материалы. При измерении  $S$  параметров таких материалов электрические и магнитные потери трудно отличимы друг от друга.

Поэтому предложено проводить измерения в двух отдельных условиях – 1. при помещении образца в область холостого хода на край разомкнутого коаксиала. Образец находится в максимуме электрического поля и минимуме магнитного поля. В этом случае можно найти диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери определяемые входным сопротивлением  $Z_{вх}$ .

$$Z_{вх} = Zcth(\gamma l) \approx Z/\gamma l = \frac{1}{((G + i\omega C_0 * \varepsilon(1 - itg\delta\varepsilon))l)}$$

2. при помещении образца в область короткого замыкания на край короткозамкнутого коаксиала. В этом случае электрическое поле близко к нулю, а магнитное максимально.

Здесь проявляются магнитные свойства образца.

$$Z_{вх} = Zth(\gamma l) \approx Z\gamma l = (R + i\omega L_0 * \mu(1 - itg\delta\mu))l;$$

Правильное определение всех параметров возможно только при одновременном учёте и оптимизации этих двух измерений.

Для достоверности указанных измерений необходимо, чтобы образец имел небольшую длину, т.к. при увеличении длины выигрыш предложенного метода нивелируется.

#### 4. Аппроксимация результатов измерения.

На первом этапе оптимизировались расчётные параметры ферроэпоксида в каждой частотной точке до соответствия с измеренными параметрами в оснастках холостого хода и короткого замыкания. Таким образом определялся тип частотного изменения параметров.

На втором этапе для полученных параметров ферроэпоксида находились коэффициенты аппроксимирующих формул:

$$\mu = \frac{k}{f + k1} + k2 * f + k3 - \frac{k4}{f + k5}$$

$$tg\delta\mu = ktm1 * th(ktm2 * f) + ktm4 * (1 + th(ktm3 * (f - ktm5)))$$

$$\varepsilon = \frac{kep1}{f + kep2} + kep3$$

Значения коэффициентов приведены в таблице 1

k=3,016	ktm1=0,6517	kep1=0,4237
k1=0,758	ktm2=0,2282	kep2=0,03837
k2=-0,1768	ktm3=0,1212	kep3=9,928
k3=2,206	ktm4=2,762	
k4=0.7442	ktm5=12,51	
k5=37,47		

На третьем этапе формулы с соответствующими коэффициентами аппроксимации были заведены в программу и проводились расчеты по ним в диапазоне частот.

#### 5. Результаты измерения.

Значения параметров ферроэпоксида в диапазоне частот от 0.2 ГГц до 10 ГГц представлены на рис. 2-3.

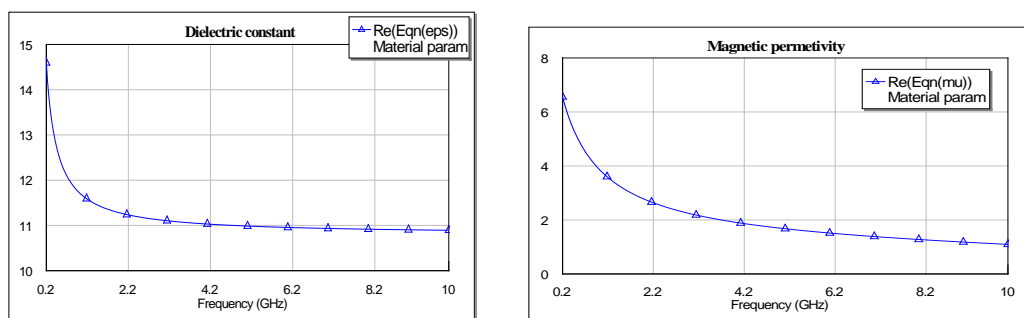


Рис. 2. Относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость ферроэпоксида.

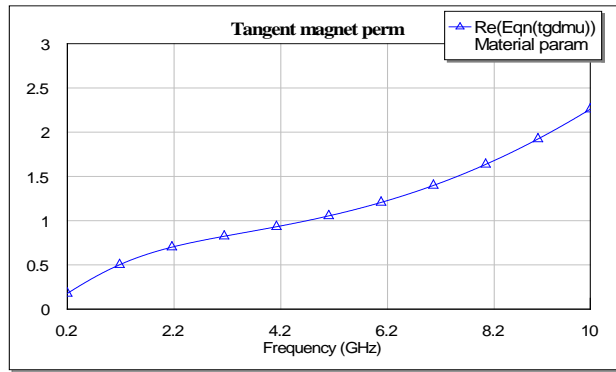


Рис. 3. Тангенс магнитных потерь ферроэпоксида

На рис. 4 – 5 показано сравнение измеренных и построенных по выше указанным формулам S параметров для короткого замыкания S11 и холостого хода S22 на краю коаксиала для экспериментального образца длиной  $l=3.67$ мм.

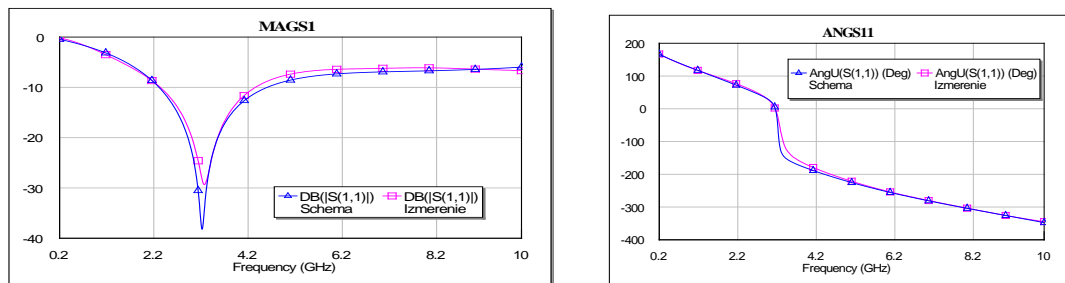


Рис. 4 Расчетные и экспериментальные модуль и фаза коэффициента отражения от ферроэпоксида, расположенного у короткозамкнутого конца коаксиала.

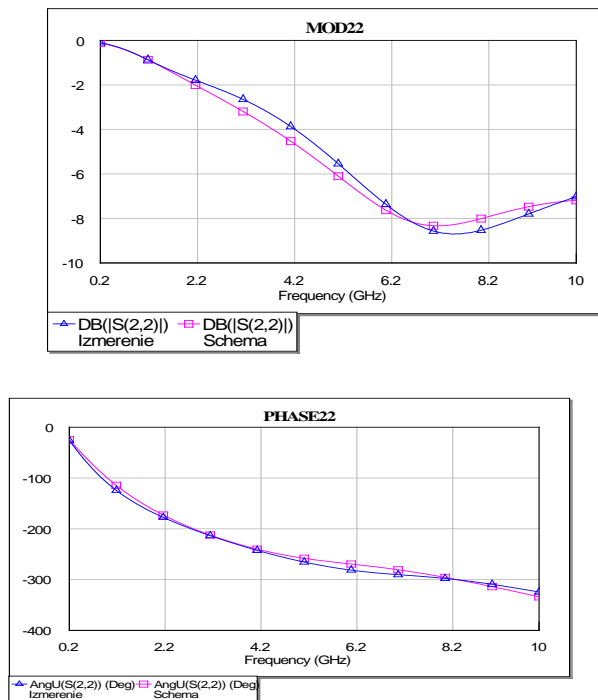


Рис. 5 Экспериментальные и расчетные модуль и фаза коэффициента отражения от ферроэпоксида расположенного у открытого конца коаксиала.

Как видно из рис. 3 тангенс угла магнитных потерь имеет довольно большое значение от 0.2 до 2.2, что значительно превосходит тангенс угла диэлектрических потерь 0.028, уверенно измеренный в диапазоне от 0,2 до 1ГГц для образца длиной 3.67 мм. Поэтому в дальнейших расчетах  $\operatorname{tg}\delta$  считался постоянным и равным 0.028.

В связи с большим замедлением  $n \approx \sqrt{\mu * \varepsilon} = 5$

длина образца для измерения до 10ГГц не должна превышать  $\lambda/60$  или  $\leq 0,5$ мм, что для хрупкого ферроэпоксида трудно выполнимо.

С другой стороны проведенные расчеты показывают незначительное влияние тангенса диэлектрических потерь на СВЧ характеристики на высоких частотах, поэтому принятое нами допущение его постоянства вполне закономерно.

### **Заключение.**

Разработана оригинальная методика измерения параметров ферроэпоксида, позволяющая определить магнитные и диэлектрические свойства в диапазоне частот.

Получены формулы, аппроксимирующие частотные зависимости параметров ферроэпоксида в диапазоне частот от 0,2 до 10ГГц.

### **Библиографический список.**

1. К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. «Машиное проектирование СВЧ устройств». Москва, «Радио и связь», 1987 г.
2. М. П. Пархоменко, Д. С. Каленов, Ю. Ф. Абакумов “Резонаторный метод для определения диэлектрических и магнитных параметров материалов и экспериментальная установка на его основе в миллиметровом диапазоне длин волн”.  
Электронная техника, сер. 1 СВЧ –Техника, вып. 2(517), 2013
3. Справочник по расчету и конструированию СВЧ устройств. Под редакцией В. И. Вольман. Москва «Радио и связь» 1982
4. Agilent Technologies Inc. Application notes 5989-2589EN. 2013 “Basics of measuring the dielectric properties of materials”.