

**Григорьев А.Д.**  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

## Измерение электрических параметров карбид-кремниевых поглотителей в микроволновом диапазоне

*Представлена методика измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей и тангенсов углов потерь поглотителей из поликристаллического карбида кремния в микроволновом диапазоне. Описана схема и конструкция измерительной установки, а также результаты измерений. Отмечены основные источники погрешности полученных результатов и сделана оценка погрешности измерения. Предложена методика калибровки анализатора цепей, позволяющая минимизировать погрешность измерения.*

**Ключевые слова:** Карбид кремния, поглотители, измерение параметров диэлектриков, микроволны.

В настоящее время карбид кремния (SiC) широко применяется в микроволновой электронике как в виде монокристаллических подложек для транзисторов и интегральных схем, так и в виде поликристаллической керамики для поглотителей, используемых в согласованных нагрузках. Благодаря высокой теплопроводности такие поглотители могут рассеивать большое количество тепла, увеличивая тем самым максимально допустимую мощность устройства. Поликристаллический карбид кремния – достаточно распространенный и дешевый материал, используемый, в основном, в качестве абразива.

Для успешного применения этого материала необходимо знать их электрические параметры — диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь, так как у разных производителей и в разных партиях они существенно различаются. Следует

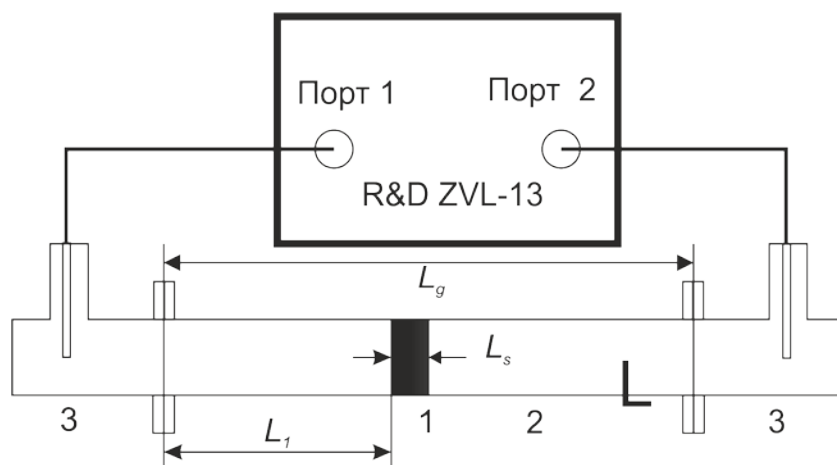


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки  
отметить, что поглотители должны иметь большое значение тангенса угла потерь. В связи с этим был выбран волноводный метод измерений.

Функциональная схема измерительной установки показана на рис. 1. Измеряемый образец 1 помещен в отрезок прямоугольного волновода 2. Образец имеет форму параллелепипеда длиной  $L_s$ , полностью заполняющего поперечное сечение волновода, который имеет толщину  $L_g$ . К волноводу с обеих сторон подключены коаксиально-волноводные переходы (КВП) 3, коаксиальные плечи которых соединены с портами цифрового анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVL-13.

В процессе измерений определяются и записываются в файл S-параметры отрезка волновода с образцом в заданном диапазоне частот. Затем эти данные обрабатываются с помощью специальной программы, составленной в среде MatLab. Для обработки используется метод Николсона-Росса-Вейра (NRW метод) [1] [2], как наиболее точный. В соответствии с этим методом вычисляется коэффициент отражения от образца

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1}, \quad (1)$$

где

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{21}}. \quad (2)$$

Знак в этой формуле выбирается из условия  $|\Gamma| \leq 1$ . Затем определяется коэффициент прохождения

$$T = \frac{S_{11} + S_{12} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma}. \quad (3)$$

Выражения (1) и (3) позволяют определить комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости образца:

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{(1/\lambda_0^2) - (1/\lambda_c^2)}}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[ (1/\lambda_c^2) - (1/\Lambda^2) \right]}, \quad (5)$$

где

$$\Lambda^2 = - \left[ \frac{1}{2\pi L_s} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2. \quad (6)$$

В этих выражениях  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве,  $\lambda_c$  – критическая длина волны в измерительном волноводе.

Следует заметить, что выражение (6) имеет бесчисленное множество значений, так как мнимая часть коэффициента прохождения определена с точностью до  $2\pi n$ , где  $n$  – произвольное целое число. При этом фаза коэффициента прохождения  $T$  не меняется при изменении толщины образца на целое число длин волн. Для устранения этой неоднозначности необходимо рассчитать групповое время задержки сигнала при прохождении по волноводу

$$\tau_{g,n} = L_g \frac{d}{df} \left( \frac{\varepsilon_r \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

для каждого  $n$ -го решения уравнений (4) – (5) и сравнить его действительным групповым временем задержки

$$\tau_g = - \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{df}, \quad (8)$$

где  $\varphi$  – фаза коэффициента прохождения  $T$ . Правильное значение  $n = k$  должно удовлетворять условию  $\tau_{g,k} - \tau_g = 0$ .

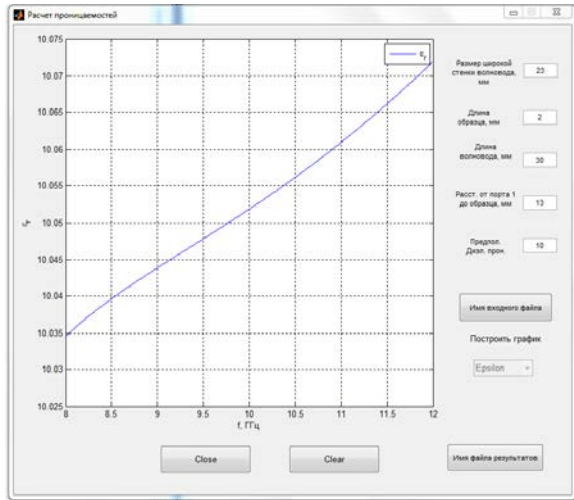


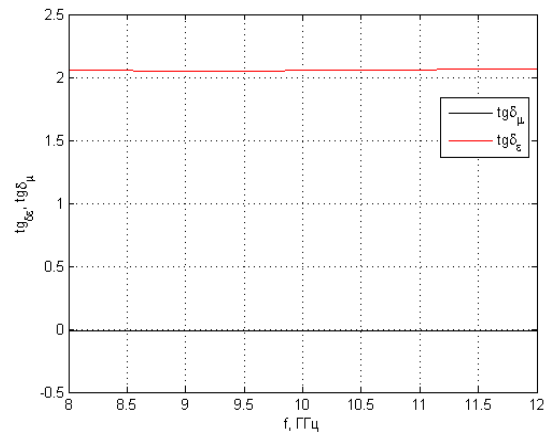
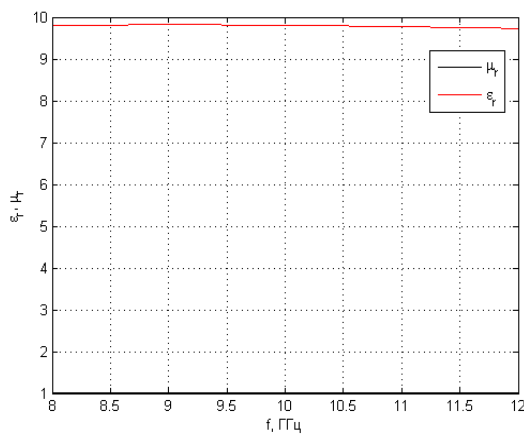
Рис. 2. Графическое окно программы

вводились в программу расчета проницаемостей. Результаты расчета показаны на рис. 2. Как видно, они очень хорошо совпадают с параметрами, заданными в модели, несмотря на

Описанный алгоритм реализован в программе, написанной в среде MATLAB. Графическое окно программы показано на рис. 2. Для верификации алгоритма было проведено моделирование волновода с образцом в диапазоне частот 8...12 ГГц. Волновод сечением 23x10 мм<sup>2</sup> имел длину 30 мм, толщина образца 2 мм, расстояние от первого порта до образца 13 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость образца  $\epsilon_r = 10$ , относительная магнитная проницаемость  $\mu_r = 1$ , тангенсы углов диэлектрических и магнитных потерь  $\text{tg } \delta_\epsilon = 2$ ,  $\text{tg } \delta_\mu = 0$ . Моделирование проводилось с помощью программы RFS [3]. S-параметры, полученные при моделировании,

Рис. 2 – Результаты измерений

очень большое значение тангенса угла диэлектрических потерь. Полученные результаты



позволяют перейти к измерениям реальных материалов.

Для получения правильных результатов измерений необходимо точно указывать положение плоскостей отсчета портов, относительно которых измеряются S-параметры. Несмотря на то, что алгоритм, изложенный в [2], позволяет избавиться от необходимости учитывать реальное положение плоскостей отсчета, в действительности его использование приводит к большой погрешности, особенно для образцов с малыми потерями. Поэтому в работе использовался алгоритм, описанный в [1] с некоторыми поправками. Эти поправки касаются вычисления группового времени запаздывания по формуле (7). Как выяснилось в процессе численных экспериментов, это время необходимо рассчитывать для неположительных значений  $n = -5, -4...0$ .

Наличие в схеме КВП не позволяет непосредственно использовать калибровку анализатора цепей с помощью коаксиального калибровочного набора. При отсутствии волноводного калибровочного набора калибровка анализатора цепей производится следующим образом:

- калибруется анализатор с помощью коаксиального измерительного набора.
- Измеряются S-параметры соединенных друг с другом КВП.
- Измеренные параметры используются для корректировки (deembeddig) положения плоскостей отсчета при измерениях волновода с образцом.

По описанной методике был проведен ряд измерений диэлектриков с известными параметрами и поглотителей на основе карбида кремния. Измерения проводились в волноводе сечением 23x10 мм<sup>2</sup>, толщина образцов находилась в пределах 0,8...2 мм. В таблице приведены некоторые результаты измерений, выполненных на частоте 10 ГГц. Приводятся также (при наличии) справочные данные, взятые из [4].

Таблица

Материал	$\epsilon_r$		$\mu_r$		$\text{tg } \delta_\epsilon$		$\text{tg } \delta_\mu$	
	Изм.	Справ.	Изм.	Справ.	Изм.	Справ.	Изм.	Справ.
Фторопласт-4	2,03	2±0,1	1	1	5·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	-2·10 <sup>-5</sup>	0
Стекло-текстолит СФ1-35	6,5	6	1,05	1	3·10 <sup>-3</sup>	2,5·10 <sup>-3</sup>	1,5·10 <sup>-5</sup>	0
Карбид кремния 53С	12	-	1,05	-	1,1	-	-1	-
Карбид кремния 54С	7,5	-	0,95	-	0,5	-	1,2·10 <sup>-4</sup>	-

Как видно, измеренные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь фторопласта и стеклотекстолита близки к справочным данным. Измеренные значения параметров абразивов на основе карбида кремния свидетельствуют о перспективности использования их в конструкциях согласованных нагрузок высокого уровня мощности.

#### Библиографический список

1. L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo. Microwave electronics. Measurement and materials characterization. N.Y.: John Wiley & Sons, 2004, 549 p.
2. NIST technical notes 1536, Dec. 2006.
3. Григорьев А.Д., Салимов Р.В., Тихонов Р.И. Моделирование антенн сотовых телефонов методом векторных конечных элементов. – РиЭ, 2012, т. 57, № 3, с. 261-270.
4. Вольман В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н.Либ и др.; Под ред. В.И. Вольмана – М.: Радио и связь, 1982.