

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

Адаптивный метод измерения диэлектрических параметров поглотителей СВЧ

Представлена методика измерения параметров диэлектриков с большими потерями на СВЧ. Методика основана на измерении коэффициента отражения от коаксиальной линии, нагруженной на конце камерой с исследуемым диэлектриком. Для исключения влияния положения плоскости отсчета используется созданная методом математического моделирования база данных, из которой специально созданная программа выбирает наиболее близкие к измеренным параметрам значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Методика опробована на образцах поглотителей из поликристаллического карбида кремния.

Ключевые слова: Микроволновые измерения, коаксиальные линии передачи, поглотители СВЧ.

Измерение параметров мощных транзисторных и вакуумных усилителей СВЧ требует применения согласованных нагрузок, способных рассеивать большую мощность. При этом желательно использовать нагрузки без жидкостного охлаждения. Используемые в таких нагрузках поглотители типа феррооксида не позволяют рассеивать большие мощности ввиду малой допустимой температуры материала. В связи с этим перспективно использование нагрузок на основе поликристаллического карбида кремния, обладающего высоким тангенсом угла диэлектрических потерь и допускающим нагрев до 400...500 °С. Этот материал выпускается промышленностью в качестве абразива, он достаточно дешев и доступен. К сожалению, изготовители не приводят данные о диэлектрических параметрах этого материала на СВЧ, что приводит к необходимости проводить соответствующие измерения перед тем, как конструировать нагрузки.

Среди многочисленных методов измерения параметров диэлектриков на СВЧ наибольшее распространение получил волноводный метод Николсона-Росса-Вейра (NRW метод) [1] [2]. 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. Этот метод был реализован и испытан [3], однако результаты оказались неудовлетворительными ввиду необходимости использования коаксиально-волноводных переходов, электрическая длина которых не поддавалась точному учету в рамках этого метода и зашумленности результатов измерений. В связи с этим был предложен новый метод, не требующий точного определения положения плоскости отсчета при измерении коэффициента отражения.

Измерения проводятся в коаксиальной линии, нагруженной на конце камерой с исследуемым материалом. Подобная методика описана в литературе [1], однако она требует калибровки по известным значениям диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь

трех известных материалов. Для исключения этой калибровки в настоящей работе предлагается использовать базу данных, созданную с помощью математического моделирования измерительной камеры с различными материалами. Затем производится измерение коэффициента отражения реального образца и из базы данных выбираются значения, наиболее близко приближающиеся к измеренным.

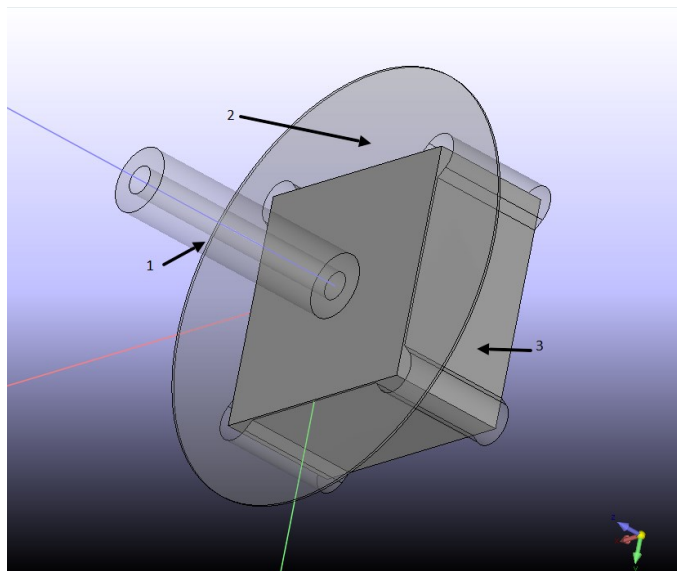


Рис. 1. Измерительная камера

Рассмотрим предлагаемый метод подробнее. Измерительная камера состоит из отрезка коаксиальной линии 1 и металлического контейнера 3 в который помещается измеряемый образец 2. Образец должен плотно заполнять контейнер. На конце внутреннего проводника коаксиальной линии имеется пружинящий контакт, обеспечивающий плотное соединение проводника с образцом. Коаксиальная линия подключается к цифровому анализатору цепей Rohde & Schwarz ZVL-13, с помощью которого измеряется модуль и фаза коэффициента отражения на заданной частоте.

База данных создавалась на той же заданной частоте с помощью программы электромагнитного моделирования RFS, основанной на методе векторных конечных элементов [4]. Она представляет собой таблицы, содержащие значения модуля и фазы коэффициента отражения в функции от относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Относительная магнитная проницаемость принималась равной единице, а тангенс угла магнитных потерь – нулю. Исходя из требуемой точности определения параметров, значения диэлектрической проницаемости изменялись от 1 до 21 с шагом 0.5, а тангенса угла потерь – от 0 до 0.6 с шагом 0.05. Перед созданием базы данных производился подбор длины коаксиальной линии в модели таким образом, чтобы значения фазы коэффициента отражения при моделировании и измерении совпали. При этом моделирование и измерение проводились в отсутствие образца. Таким образом устранялась неопределенность, обусловленная наличием соединителя камеры с анализатором цепей.

Для выбора нужного значения параметров диэлектрика была создана вычислительная программа DiCo, работающая в среде MATLAB. Программа импортирует базу данных и результаты измерений и находит минимум целевой функции

$$F = [|S_{11}^{\text{mod}}(i, j)| - |S_{11}^{\text{meas}}|]^2 + a [\varphi^{\text{mod}}(i, j) - \varphi^{\text{meas}}]^2,$$

где i, j – индексы значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь, mod и meas – индексы, обозначающие моделированные и измеренные значения, φ – фаза коэффициента отражения S_{11} в градусах, a – калибровочный коэффициент. Значение этого коэффициента подбиралось так, чтобы первый и второй члены целевой функции имели приблизительно одинаковые значения. Индексы i_{\min}, j_{\min} , соответствующие минимальному значению F , определяют параметры образца. Для увеличения точности проводится интерполяция между параметрами, соответствующими минимальному и ближайшему к нему значениям

целевой функции. При создании базы данных ϵ_r изменялась в пределах от 5 до 20 с шагом 0.5, а $\text{tg} \delta_c$ – в пределах от 0 до 0.5 с шагом 0.05.

Ввиду отсутствия материалов с известными точными значениями параметров тестирование метода производилось также с помощью математического моделирования. В программе RFS задавались значения параметров образца, не совпадающие с записанными в модели. Полученный коэффициент отражения вводился в программу DiCo. Полученные по этой программе значения параметров образца и заданные в программе RFS представлены в таблице 1.

Табл. 1

ϵ_r			$\text{tg} \delta$		
Заданное значение	Результат расчета	Погрешность, %	Заданное значение	Результат расчета	Погрешность, %
6.3	6.5	3.1	0,07	0.05	28.5
12.1	12.0	0.8	0,07	0.05	28.5
18.4	18.0	2.1	0,07	0.5	28.5
6.3	6.5	3.1	0,32	0.3	6.2
12.1	12.0	0.8	0,32	0.3	6.2
18.4	18.5	0.5	0,32	0.3	6.2

При тестировании программы выяснилось, что изменение калибровочного коэффициента в достаточно широких пределах (20...200) не влияет на результат расчета. Как видно из таблицы, погрешность расчета диэлектрической проницаемости не превышает трех процентов. Для малых значений тангенса угла потерь погрешность достаточно велика, однако это не является препятствием для использования программы, так как она предназначена для измерения параметров материалов с большими потерями. К недостаткам метода следует отнести необходимость создавать базу данных для каждой частоты, на которой предполагается измерение параметров материала.

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. Измерение электрических параметров карбид-кремниевых поглотителей в микроволновом диапазоне. Материалы всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», СПб: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» с. 30.05-02.06 2016 г.
4. 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.