

УДК 537.87

ОПТИМАЛЬНАЯ ВОЛНОВОДНАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ КОНСТАНТ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ

Пономаренко В.И., Попов В.В.

*Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: slavapop@gmail.com*

В работе анализируется волноводная методика определения диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов на предмет минимизации погрешности измерений. Показано, что минимальная погрешность измерений может быть достигнута при некотором оптимальном расстоянии образца от короткозамыкателя, которое зависит от толщины пластины и значения материальных констант. Также получено, что для диэлектрического образца целесообразно проводить восстановление как диэлектрической, так и магнитной проницаемости, без задания последней априори равной магнитной проницаемости вакуума. Предложенная методика применена для измерения диэлектрической проницаемости тефлона.

Ключевые слова: диэлектрическая и магнитная проницаемость, оптимизация волноводных измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов широко применяются при разработке устройств диапазона сверхвысоких частот (СВЧ), например, поглотителей электромагнитных волн [1-3].

Наиболее часто такие измерения проводятся классическим методом короткого замыкания и холостого хода с образцами в виде пластин, помещаемых в прямоугольный волновод [4-6]. При этом измеряются значения комплексного коэффициента отражения R при двух положениях образца: на короткозамыкателе (положение $KЗ$) и на расстоянии четверти длины волны от него (режим холостого хода $ХХ$). Такой выбор положений образца обосновывается физическими соображениями, заключающимися в том, что в положении $KЗ$ образец находится в пучности магнитного поля и R зависит главным образом от его магнитной проницаемости, тогда как в положении $ХХ$ образец находится в пучности электрического поля и на величину R влияет в основном диэлектрическая проницаемость [6]. Кроме того, расчетные формулы, связывающие материальные константы с R существенно упрощаются по сравнению со случаем отличных от $KЗ$ и $ХХ$ положений образца в волноводе. В случае немагнитного образца в расчетных формулах полагается магнитная проницаемость $\mu = \mu_0$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, что позволяет однозначно восстанавливать диэлектрическую проницаемость ε .

Целью настоящей статьи является анализ метода $KЗ$ и $ХХ$ на предмет точности измерения материальных констант и обоснование оптимальной методики измерений, при которой достигается минимальная погрешность измерения ε и μ при заданной точности ΔR измерения модуля коэффициента отражения и точности $\Delta \varphi$ измерения фазы.

1. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Обозначим (Рис. 1):

a – размер широкой стенки волновода;

d – толщина пластины-образца;

ω – циклическая частота;

Γ_0 – постоянная распространения волны типа H_{10} ;

s_1, s_2 – два значения расстояния от образца до плоскости короткозамыкателя;

R_1, R_2 – соответствующие значения коэффициента отражения на границе образца, удаленной от короткозамыкателя;

$i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

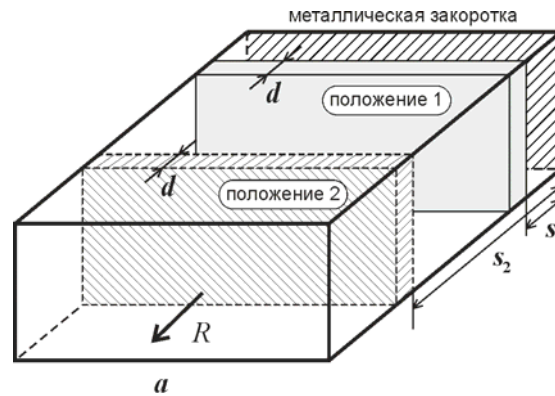


Рис. 1. Магнитоэлектрическая пластина в прямоугольном волноводе с короткозамыкателем.

Представление поле внутри образца и вне его в виде суперпозиции прямых и обратных волн основного типа и наложение граничных условий для компонент поля позволяет аналитически решить прямую задачу вычисления величин R_1, R_2 при известных значениях ε и μ . Из решения прямой задачи находится решение обратной задачи, состоящей в определении материальных констант по значениям R :

$$\mu = -i \frac{\Gamma}{\omega} x, \quad \varepsilon = \frac{\Gamma^2 + (\pi/a)^2}{\omega^2 \mu}, \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{1}{2id_1} \left\{ \ln \left| \frac{1+iy}{1-iy} \right| + i \arg \left(\frac{1+iy}{1-iy} \right) + 2n\pi i \right\}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$$x^2 = \frac{\alpha_1 \beta_1 (\beta_2 - \alpha_2) - \alpha_2 \beta_2 (\beta_1 - \alpha_1)}{\beta_1 - \alpha_1 - \beta_2 + \alpha_2}, \quad y = \frac{\beta_2 - \alpha_2 - \beta_1 + \alpha_1}{\alpha_2 \beta_2 - \alpha_1 \beta_1},$$

$$\alpha_{1,2} = i \frac{\omega \mu_0}{\Gamma_0} \operatorname{tg}(\Gamma_0 s_{1,2}), \beta_{1,2} = -\frac{\omega \mu_0 R_{1,2}}{\Gamma_0 (1 - R_{1,2})}.$$

В частном случае $s_1 = 0$, $s_2 = \lambda/4$, что соответствует положениям образца в методе КЗ и ХХ, имеем $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \infty$. При этом формулы (1) упрощаются и приводят к выражениям для материальных констант, совпадающим с приведенными в [6].

Из (1) следует, что для магнитоэлектрической пластины восстановление ее материальных констант по измерениям R при двух положениях образца в волноводе не является однозначным ввиду множественности возможных значений величины Γ . В связи с этим для отбора истинных значений ε и μ необходимо дополнительное измерение значения R_3 коэффициента отражения при расстоянии s_3 от образца до короткозамыкателя, отличном от s_1 и s_2 . В случае же немагнитной пластины, полагая в (1) $\mu = \mu_0$, находим диэлектрическую проницаемость однозначно без дополнительного измерения.

2. СПОСОБ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ

Задаваясь значениями величин $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$, $\mu = \mu' + i\mu''$, s_1 , s_2 , s_3 , можно вычислить из решения прямой задачи для волновода с образцом точные значения коэффициента отражения: R_1 , R_2 , R_3 .

Для моделирования искусственно внесем в значения коэффициента отражения погрешности ΔR , $\Delta \varphi$:

$R_{\Delta R}^+$ – модуль $|R|$ увеличен на $\Delta R = 0.01$, фаза R оставлена без изменения;

$R_{\Delta R}^-$ – модуль $|R|$ уменьшен на $\Delta R = 0.01$, фаза R оставлена без изменения;

$R_{\Delta \varphi}^+$ – фаза R увеличена на $\Delta \varphi = 1^\circ$, величина модуля $|R|$ оставлена без изменения;

$R_{\Delta \varphi}^-$ – фаза R уменьшена на $\Delta \varphi = 1^\circ$, модуль $|R|$ оставлен без изменения;

$R_{\Delta R, \Delta \varphi}^{++}$ – модуль и фаза R одновременно увеличиваются на ΔR и $\Delta \varphi$ соответственно.

Аналогично задаются величины $R_{\Delta R, \Delta \varphi}^{--}$, $R_{\Delta R, \Delta \varphi}^{+-}$, $R_{\Delta R, \Delta \varphi}^{-+}$.

Учитывая, что 4 измененных значения R_1 комбинируются с любым из 4 измененных значений R_2 , получаем 16 возможных комбинаций (R_1, R_2) . По каждой из этих комбинаций производится, с использованием величины R_3 для обеспечения однозначности, восстановление проницаемостей образца, с применением формул (1):

$$\begin{cases} \varepsilon_n = \varepsilon'_n + i\varepsilon''_n \\ \mu_n = \mu'_n + i\mu''_n \end{cases}, n = 1, 2, \dots, 16 \quad (2)$$

Вычисляются погрешности восстановления проницаемости образца:

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon'_n = |\varepsilon'_n - \varepsilon'|, \Delta\varepsilon''_n = |\varepsilon''_n - \varepsilon''| \\ \Delta\mu'_n = |\mu'_n - \mu'|, \Delta\mu''_n = |\mu''_n - \mu''| \end{cases}, n = 1, 2, \dots, 16. \quad (3)$$

Из совокупностей (3) выбираются наибольшие значения $\Delta\varepsilon'$, $\Delta\varepsilon''$, $\Delta\mu'$, $\Delta\mu''$, которые и принимаются в качестве верхних оценок возможной погрешности измерения диэлектрической и магнитной проницаемости образца. В качестве относительных оценок погрешности принимаются величины

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon'_{\text{отн}} &= \frac{\Delta\varepsilon'}{|\varepsilon|} \cdot 100\%, \Delta\varepsilon''_{\text{отн}} = \frac{\Delta\varepsilon''}{|\varepsilon|} \cdot 100\% \\ \Delta\mu'_{\text{отн}} &= \frac{\Delta\mu'}{|\mu|} \cdot 100\%, \Delta\mu''_{\text{отн}} = \frac{\Delta\mu''}{|\mu|} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (4)$$

Варьируя расстояния s_1 , s_2 , можно определить их оптимальные значения, которым соответствуют минимальные значения относительной погрешности определения материальных констант.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Современные векторные анализаторы цепей обеспечивает точность измерения модуля R около 1% и точность измерения фазы R , близкую к 1 град [7]. В связи с этим при компьютерном моделировании процесса измерений полагалось $\Delta R = 0.01$ и $\Delta\varphi = \pi/180$ рад.

Результаты, приведенные в Таблицах 1 и 2, относятся к волноводу с размером широкой стенки $a = 23$ мм и частоте $f = 10$ ГГц при значении расстояния $s_1 = 0$. Относительные погрешности приведены в процентах. Через ε , μ обозначены относительные проницаемости образца.

Таблица 1

Влияние расстояния s_2 от образца до короткозамыкателя на погрешность измерения материальных констант образца с $\varepsilon = 20 + 1i$, $\mu = 3 + 2i$, $d = 1$ мм.

Расстояние s_2 , мм	$\Delta\varepsilon'_{\text{отн}}$	$\Delta\varepsilon''_{\text{отн}}$	$\Delta\mu'_{\text{отн}}$	$\Delta\mu''_{\text{отн}}$
9.9 ($\lambda/4$)	4.0	4.0	5.0	5.0
16	3.1	2.7	3.1	3.0

Из Таблицы 1 видно, что погрешности можно существенно уменьшить, если вместо четвертьволнового расстояния s_2 поместить образец на расстоянии $s_2 = 16$ мм, существенно отличающемся от «классического». Аналогичные результаты были получены при моделировании процесса измерения образцов с другими значениями материальных констант. Существенно, что для одного и того же материала образца оптимальное расстояние s_2 зависит от его толщины. Так, для материала, к которому относится Таблица 1, оптимальное расстояние $s_2 = 5$ мм, если толщина образца $d = 0.5$ мм.

Таблица 2

Влияние расстояния s_2 и способа восстановления диэлектрической проницаемости немагнитного образца на погрешность измерений.

Относительная диэлектрическая проницаемость образца	$s_2 = 9.9$ мм ($\lambda/4$)				$s_2 = 5.5$ мм			
	μ измеряется		$\mu = 1$		μ измеряется		$\mu = 1$	
	$\Delta\varepsilon'_{отн}$	$\Delta\varepsilon''_{отн}$	$\Delta\varepsilon'_{отн}$	$\Delta\varepsilon''_{отн}$	$\Delta\varepsilon'_{отн}$	$\Delta\varepsilon''_{отн}$	$\Delta\varepsilon'_{отн}$	$\Delta\varepsilon''_{отн}$
$\varepsilon = 10 + 3i$, $d = 2$ мм	9	9	14	14	5.2	5.2	8.7	8.8
$\varepsilon = 2 + 3i$, $d = 2$ мм	2.7	2.5	5.6	5.7	1	2	4	5
$\varepsilon = 20 + 3i$, $d = 1$ мм	8	6	13	10	5	4	10	7

Таблица 2, относящаяся к образцам с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1$, иллюстрирует как возможность уменьшения погрешности измерения диэлектрической проницаемости за счет выбора расстояния s_2 , так и выбором способа восстановления диэлектрической проницаемости вместе с магнитной проницаемостью, не задавая ее априори равной единице. Так, при $\varepsilon = 2 + 3i$ и расстоянии $s_2 = 5.5$ мм погрешности $\Delta\varepsilon'_{отн}$ и $\Delta\varepsilon''_{отн}$ снижаются соответственно в 4 и 2.5 раза, если проводить измерение диэлектрической проницаемости вместе с магнитной. Аналогичный результат получен и при других значениях комплексной диэлектрической проницаемости немагнитного образца. Объяснение такой зависимости погрешности измерения диэлектрической проницаемости немагнитного образца от способа ее измерения, по нашему мнению, следующее. Если положить в расчетных формулах (1) $\mu = 1$, то погрешность измерения R целиком скажется на точности восстановления диэлектрической проницаемости. Если же восстанавливать с применением формул (1) одновременно

ε и μ , то погрешность измерения R «распределится» между диэлектрической и магнитной проницаемостями.

Как показали многочисленные расчеты, включение в число варьируемых параметров расстояния s_1 не приводит к существенному снижению погрешностей. Таким образом, при моделировании процесса измерений достаточно, зафиксировав расстояние s_1 (не обязательно равным нулю), варьировать лишь расстояние s_2 с целью определения его оптимального значения.

Изложенный метод моделирования был применен при измерении диэлектрической проницаемости тефлона на основе измерения КО на установке, реализующей многорезонансный метод [8-10]. Для относительной диэлектрической проницаемости тефлона получено: $\varepsilon' = 2.07 \pm 0.02$, $\varepsilon'' = 0.00 \pm 0.01$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе компьютерного моделирования показано, что классическая схема измерения материальных констант магнитодиэлектриков в волноводе, при которой плоский образец последовательно располагается на короткозамыкателе и на расстоянии четверти длины волны от него, в общем случае не является оптимальной в плане минимизации погрешностей.

Показано, что оптимальное расстояние образца от короткозамыкателя зависит от его толщины и значения материальных констант. Это расстояние можно определить предложенным в работе способом моделирования после предварительного приближенного измерения материальных констант методом короткого замыкания и холостого хода.

Показано, что схема измерений, при которой вместо положения образца на короткозамыкателе применяется смещенное по отношению к короткозамыкателю положение, не дает существенного уменьшения погрешностей измерения материальных констант.

Показано, что для диэлектрического образца целесообразно проводить восстановление как диэлектрической, так и магнитной проницаемости, без задания последней априори равной магнитной проницаемости вакуума.

Предложенная методика повышения точности измерения материальных констант применена для измерения диэлектрической проницаемости тефлона с относительной погрешностью, не превышающей 0.01.

Список литературы

1. Qin F. A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles / Qin F., Brosseau C. // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – Volume 111, Issue 6. – P. 061301 (24 pages).
2. Microwave permeability of Co_2Z composites / Rozanov K. N., Li Z. W., Chen L. F., Koledintseva M. Y. // *Journal of Applied Physics*. – 2005. – Volume 97, Issue 1. – P. 013905 (7 pages).
3. Baker-Jarvis J. High-Frequency Dielectric Measurements / Baker-Jarvis J., Janezic M. D., DeGroot D. C. // *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*. – 2010. – Volume 13, Issue 2. – P. 24-31.

4. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization / Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan V. K. – UK : John Wiley and Sons Ltd, 2004. – 537 pages.
5. Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability / Baker-Jarvis J., Janezic M. D., Grosvenor J. H., Geyer R. G. // NIST Technical Note 1355-R, 1993. – 236 pages.
6. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / Брандт А. А. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 404 с.
7. Williams D. F. An Optimal Vector Network Analyzer Calibration Algorithm / Williams D. F., Wang J. C.-M., Arz U. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2003. – Vol. 51, No 12. – P. 2391-2401.
8. Пономаренко В. И. Многорезонансный метод измерения комплексного коэффициента отражения в волноводе / Пономаренко В. И., Попов В. В. // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 1. – С. 94-100.
9. Пономаренко В. И. Компенсация влияния собственного коэффициента отражения направленного ответвителя в многорезонансном методе измерения коэффициента отражения в волноводе / Пономаренко В. И., Попов В. В. // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 6. – С. 33-36.
10. Пономаренко В. И. Компенсация экспериментальных погрешностей в многорезонансном методе измерения коэффициента отражения в волноводе / Пономаренко В. И., Попов В. В., Виногородский Д. Ф. // Известия Вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – № 8. – С. 66-70.

Пономаренко В. І. Оптиміальна хвилеводна методика вимірювання матеріальних констант плоских зразків / Пономаренко В. І, Попов В. В. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2012. – Т. 25(64), № 1. – С. 170-176.

У роботі аналізується хвилеводна методика визначення діелектричної і магнітної проникності зразків на предмет мінімізації похибки вимірювань. Показано, що мінімальна похибка вимірювань може бути досягнута при деякій оптимальній відстані зразка від короткозамикача, яка залежить від товщини пластини і значення матеріальних констант. Також отримано, що для діелектричного зразка доцільно проводити відновлення діелектричної і магнітної проникності одночасно, без завдання останньої апріорі рівній магнітної проникності вакууму. Запропонована методика застосована для вимірювання діелектричної проникності тefлону.

Ключові слова: діелектрична і магнітна проникність, оптимізація хвилеводних вимірювань.

Ponomarenko V. I. Optimal waveguide method for measuring the material constants of flat samples / Ponomarenko V. I., Popov V. V. // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2012. – Vol. 25(64), No 1. – P. 170-176.

The paper examines the waveguide technique of determination of the permittivity and permeability of samples in order to minimize measurement error. It is shown that the minimum error of the measurement can be achieved with some optimal distance between the specimen and waveguide short, which depends on the thickness of the plate and the values of material constants. It is also shown that for the purely dielectric sample, calculation of the permittivity and permeability should be carried out simultaneously, without specifying the latter a priori equal to the magnetic permeability of vacuum. The proposed method is applied for measurement of the dielectric permittivity of Teflon.

Keywords: permittivity and permeability, optimization of waveguide measurements.

Поступила в редакцію 30.04.2012 г.