

УДК 621.372.826

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ И ОТРАЖАЮЩИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В КОРТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, Н. А. Федосеев
ФирЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Л. А. Троицкая

*Филиал Московского государственного технического университета
радиотехники, электроники и автоматики, г. Фрязино*

Описана методика определения параметров сильно поглощающих и отражающих диэлектриков из измерений модуля и фазы коэффициента отражения электромагнитной волны на границе воздух – исследуемый диэлектрик и приведены формулы, по которым находится комплексный показатель преломления исследуемого диэлектрика.

КС: измерение, диэлектрический параметр, миллиметровый диапазон, субмиллиметровый диапазон, интерферометр Майкельсона, металлодиэлектрический волновод

A methodology of characterization of strongly absorbing and reflecting dielectrics is described on the basis of measuring module and phase of electromagnetic wave reflection coefficient at the border air – investigated dielectric and the equations for defining complex refractive index of the investigated dielectric are presented.

Keywords: measurement, dielectric parameter, millimeter range, Michelson interferometer, metal-dielectric waveguide

1. ВВЕДЕНИЕ

В сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазонах длин волн широко применяются металлические волноводы. Однако с уменьшением длины волны свойства этих волноводов существенно ухудшаются: увеличиваются погонные потери, уменьшается величина передаваемой мощности, повышаются требования к точности изготовления функциональных элементов. Наиболее перспективными направляющими системами в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонах являются волноводы класса «полый диэлектрический канал» (ДК-волноводы) [1, 2]. Они относятся к классу широких волноводов, поперечные размеры которых много больше длины волны. Существует большое многообразие ДК-волноводов. На рис. 1 представлен сверхразмерный металлодиэлектрический волновод, в котором на две противоположные стенки прямоугольного металлического волновода наклеены диэлектрические пленки антирезонансной толщины.

Рабочим типом волны в таком волноводе является мода LM_{11} , у которой электрическое поле спадает до нуля к краям волновода по обеим поперечным координатам (см. рис. 1), а фронт волны на выходе волновода является плоским. Эта волна обладает свойствами, близкими к свойствам плоской волны. Из других достоинств этого волновода на рабочем типе волны от-

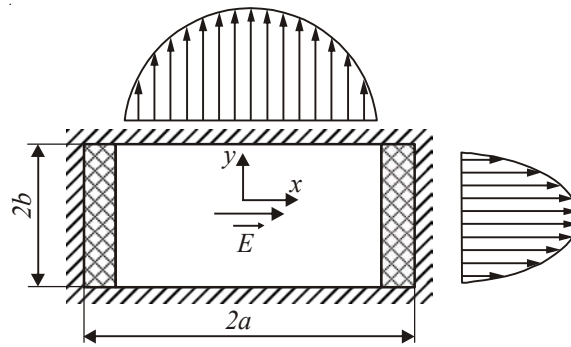


Рис. 1. Металлодиэлектрический волновод. Эпюры распределения полей волны LM_{11} в поперечном сечении волновода

метим малые погонные потери и очень малое (меньше минус 50 дБ) отражение от открытого конца волновода. Это позволяет при измерениях размещать образец непосредственно у открытого конца волновода. Описанный в данной работе метод измерения диэлектрических параметров материалов представляет собой аналог метода измерений в свободном пространстве, но в нашем случае для измерения требуются образцы гораздо меньших размеров.

2. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ И ОТРАЖАЮЩИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРНОГО ПАНОРАМНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ

Комплексный показатель преломления n исследуемого диэлектрика задается выражением $n = n_1 - jn_2$, где n_1 – его действительная, а n_2 – мнимая части; $j = \sqrt{-1}$. Значения n_1 и n_2 для каждого диэлектрика определяются экспериментально. В данном разделе рассматривается методика определения параметров сильно поглощающих и отражающих диэлектриков из измерений модуля и фазы коэффициента отражения электромагнитной волны на границе воздух – исследуемый диэлектрик и выводятся формулы, по которым находится комплексный показатель преломления исследуемого диэлектрика.

Предварительно выразим модуль и фазу коэффициента отражения электромагнитной волны на границе воздух – диэлектрик через параметры n_1 и n_2 исследуемого диэлектрика. Толщина диэлектрика такова, что отраженная волна от второй границы сильно затухает, интерференции не наблюдается. При нормальном падении волны из первой среды (показатель преломления n_0) во вторую (показатель преломления n) коэффициент отражения по полю запишется в виде [3]

$$r = \frac{n_0 - n}{n_0 + n}.$$

В нашем случае, где первой средой является воздух ($n_0 = 1$), а второй – исследуемый диэлектрик ($n = n_1 - jn_2$), эта формула примет вид

$$r = \frac{1 - (n_1 - jn_2)}{1 + (n_1 - jn_2)} = \frac{(1 - n_1) + jn_2}{(1 + n_1) - jn_2}. \quad (1)$$

Для определения фазы коэффициента отражения преобразуем выражение (1), выделив в нем действительную и мнимую части:

$$r = \frac{1 - n_1^2 - n_2^2}{(1 + n_1)^2 + n_2^2} + j \frac{2n_2}{(1 + n_1)^2 + n_2^2}.$$

Фаза φ коэффициента отражения от исследуемого диэлектрика находится из уравнения $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2n_2}{1 - n_1^2 - n_2^2}$, решение которого при $n_1 > 1$ и $n_2 > 0$ записывается следующим образом:

$$\varphi = \pi - \operatorname{arctg} \frac{2n_2}{n_1^2 + n_2^2 - 1}. \quad (2)$$

Выражение для коэффициента отражения R по мощности находится из соотношения (1):

$$R = |r|^2 = \frac{(1 - n_1)^2 + n_2^2}{(1 + n_1)^2 + n_2^2}. \quad (3)$$

Итак, определяя экспериментально, например с помощью векторного панорамного измерителя коэффициентов отражения, значения R и φ , из уравнений (2) и (3) можно найти параметры n_1 и n_2 исследуемого диэлектрика.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА С ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАЙКЕЛЬСОНА НА БАЗЕ СКАЛЯРНОГО ПАНОРАМНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ И ОТРАЖАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Векторные панорамные измерители – это дорогостоящие и не всегда доступные приборы. Большинство имеющихся измерителей являются скалярными и позволяют определять только коэффициент отражения R по мощности. Для измерения модуля и фазы коэффициента отражения предлагается интерферометр Майкельсона, построенный на базе скалярного панорамного измерителя 2-мм диапазона с использованием мостового делителя на основе металлодиэлектрического волновода. Поперечные размеры волновода составляют 14×14 мм, на его стенках наклеены тонкие пленки лавсана, а рабочий тип волны – мода LM_{11} . Как указано выше, для моды LM_{11} характерно очень малое отражение от открытого конца волновода, поэтому при измерениях образец можно располагать непосредственно у открытого конца (рис. 2).

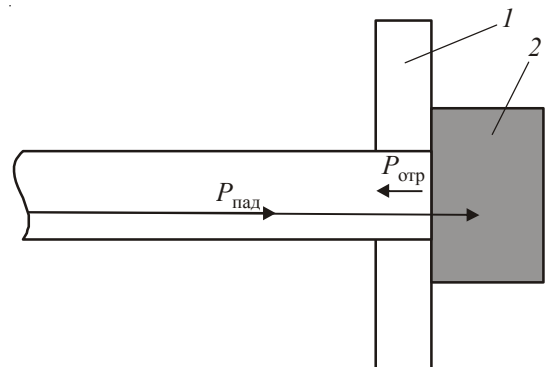


Рис. 2. Размещение образца при измерениях:

1 – металлодиэлектрический волновод с фланцем;
2 – исследуемый образец ($P_{\text{пад}}$ – падающая мощность;
 $P_{\text{отр}}$ – отраженная мощность)

Схема интерферометра Майкельсона представлена на рис. 3 и включает в себя: генераторный блок Г4–161 панорамного измерителя с рабочим диапазоном частот 118...178 ГГц 1, направленный ответвитель падающей мощности 2, индикаторный блок 3, направленный ответвитель отраженной мощности 4, мостовой делитель интерферометра (I, II и III – плечи интерферометра) 5, диэлектрическую пленку 6, подвижное металлическое зеркало с микрометрическим винтом 7, металлический отражатель 8 (или исследуемый образец, или согласованная нагрузка).

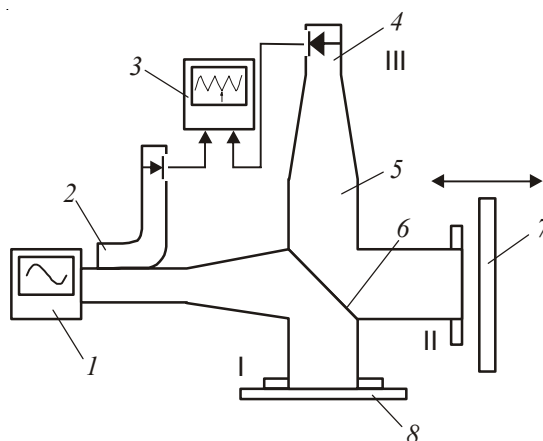


Рис. 3. Схема интерферометра Майкельсона

При проведении фазовых измерений в плече II располагалось подвижное металлическое зеркало 7, а в плече I поочередно размещались металлический отражатель и исследуемый образец 8. Сигнал от генератора панорамного измерителя поступает в мостовой делитель 5, где с помощью тонкой диэлектрической пленки 6 делится равномерно на две волны, одна из которых проходит в плечо I, другая – в плечо II. После отражения от исследуемого объекта (или металлического отражателя) и подвижного металлического зеркала эти волны возвращаются к диэлектрической пленке, которая направляет их в измерительное плечо III. Результирующий сигнал с детектора измерительного плеча передается на индикаторный блок панорамного измерителя. На экране индикатора отображается интерференционная картина из чередующихся максимумов и минимумов. Порядок при проведении фазовых измерений следующий:

- 1) выбираем частотный диапазон панорамного измерителя;
- 2) задаем с помощью частотной метки панорамного измерителя частоту измерений;
- 3) размещаем в плече I металлический отражатель;
- 4) перемещая с помощью микрометрического винта подвижное зеркало 7 в плече II, совмещаем с одним из минимумов интерференционной картины частотную метку панорамного измерителя;
- 5) зафиксировав на шкале делений микрометрического винта значение d_m положения зеркала;
- 6) меняем металлический отражатель в плече I на исследуемый образец. При этом изменится фаза коэффициента отражения и на экране индикатора положение наблюдаемого минимума сместится относительно частотной метки;
- 7) перемещая металлическое зеркало, совмещаем этот минимум с частотной меткой и зафиксировав новое значение d_s положения зеркала;

8) определяем изменение фазы B электромагнитной волны в плече II (по абсолютной величине) по формуле

$$B = (2\pi/\lambda_m)2|d_s - d_m| = [(4\pi f_m)/c]|d_s - d_m|, \quad (4)$$

где λ_m и f_m – соответственно длина волны (в вакууме) и частота минимума, которые связаны соотношением $\lambda_m = c/f_m$; c – скорость света в вакууме. Итак, измеряя значения d_s , d_m и f_m , определяем величину B .

С другой стороны, изменение фазы B электромагнитной волны равно изменению фазы коэффициента отражения, которое находится так: фаза коэффициента отражения φ_s от образца задается формулой (2), а от металлического отражателя $\varphi_m = \pi$. И выражение для изменения фазы коэффициента отражения по абсолютной величине запишется в виде

$$B = \varphi_m - \varphi_s = \arctg \frac{2n_2}{n_1^2 + n_2^2 - 1}. \quad (5)$$

При измерении коэффициента отражения R в плече I включалась согласованная нагрузка, а плоский исследуемый образец прижимался к фланцу выходного волновода в плече II. Отраженная от образца волна поступала в измерительное плечо III, и величина коэффициента отражения R фиксировалась на индикаторном блоке измерителя.

Таким образом, определяя экспериментально значения R и B , из уравнений (3) и (5) можно получить значения n_1 и n_2 комплексного показателя преломления исследуемого диэлектрика. Разрешим эту систему уравнений относительно n_1 и n_2 . Для этого перепишем уравнение (5) в виде

$$\operatorname{tg} B = \frac{2n_2}{n_1^2 + n_2^2 - 1}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} B$ – это известная величина. После несложных преобразований получим из уравнения (6) соотношение, которое связывает действительную n_1 и мнимую n_2 части комплексного показателя преломления исследуемого образца:

$$n_1 = \sqrt{1 - n_2^2 + \frac{2n_2}{\operatorname{tg} B}}. \quad (7)$$

Теперь обратимся к выражению (3), которое приведем к виду

$$R + Rn_1^2 + 2Rn_1 + Rn_2^2 = 1 + n_1^2 - 2n_1 + n_2^2.$$

Подставив в него выражение (7) для n_1 , после преобразований получаем квадратное уравнение относительно n_2 :

$$\left(\frac{1-R}{1+R}\right)^2 \left(1 + \frac{n_2}{\operatorname{tg} B}\right)^2 = 1 - n_2^2 + \frac{2n_2}{\operatorname{tg} B}.$$

Решение этого уравнения определяет мнимую часть n_2 показателя преломления исследуемого диэлектрика:

$$n_2 = \frac{\frac{(1-g)}{\operatorname{tg} B} + \sqrt{\left(\frac{(1-g)}{\operatorname{tg} B}\right)^2 + p(1-g)}}{p}, \quad (8)$$

где $g = \left(\frac{1-R}{1+R}\right)^2$, а $p = 1 + \frac{g}{\operatorname{tg}^2 B}$. Далее, подставив значение n_2 в выражение (7), находим действительную часть n_1 показателя преломления исследуемого вещества.

Используя соотношение $n = \sqrt{\varepsilon}$, которое связывает комплексный показатель преломления $n = n_1 - jn_2$ с комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2$, определяем действительную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого диэлектрика

$$\varepsilon_1 = n_1^2 - n_2^2, \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 = 2n_1 n_2. \quad (10)$$

Ниже продемонстрируем наш метод определения диэлектрической проницаемости биосовместимого и биоразлагаемого полимера полилактида с многостенными углеродными нанотрубками.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРА ПОЛИЛАКТИДА С ОДНОПРОЦЕНТНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В качестве примера применения данного метода определим комплексную диэлектрическую проницаемость материала на основе полимера полилактида (PLA), в котором содержится 1 % многостенных углеродных нанотрубок. Измерения проводились на частоте 150 ГГц. Полученные значения составили: для коэффициента отражения – минус 7,21 дБ, для фазового сдвига – 0,503 рад. Затем с помощью программы Mathcad вычислялись комплексные значения показателя преломления и диэлектрической проницаемости исследуемого материала, которые составили: $n = 1,901 - j0,986$; $\varepsilon = 2,643 - j3,751$. Оцененная погрешность измерений не превышает 6 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Текст программы в Mathcad

(Все обозначения величин и их размерности указаны в правом столбце)

$$j := \sqrt{-1} \quad f_m := 150 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad d_m := 12.30 \quad d_s := 12.38$$

$$R_{db} := -7.21 \quad R := 10^{\frac{R_{db}}{10}} = 0.19$$

$$B := \frac{4\pi f_m \cdot 10^9}{c} \cdot |d_s - d_m| \cdot 10^{-3} = 0.503$$

$$\tan(B) = 0.55$$

$$g := \frac{1 - R}{1 + R} = 0.463 \quad p := 1 + \frac{g}{(\tan(B))^2} = 2.532$$

$$n2 := \frac{\frac{(1 - g)}{\tan(B)} + \sqrt{\frac{(1 - g)^2}{\tan(B)^2} + p \cdot (1 - g)}}{p} = 0.986$$

$$n1 := \sqrt{1 - n2^2 + \frac{2n2}{\tan(B)}} = 1.901$$

$$n := n1 - j \cdot n2 = 1.901 - 0.986j$$

$$\epsilon1 := n1^2 - n2^2 = 2.643$$

$$\epsilon2 := 2n1 \cdot n2 = 3.751$$

$$\underline{\underline{\epsilon}} := \epsilon1 - j \cdot \epsilon2 = 2.643 - 3.751j$$

f_m [Гц] – частота минимума;

dm [мм] – положение подвижного металлического зеркала, когда в плече I размещена металлическая закоротка;

ds [мм] – положение подвижного металлического зеркала, когда в плече I размещен исследуемый образец;

R_{db} [дБ] – коэффициент отражения от образца;

B [рад] – изменение фазового сдвига, при размещении в плече I поочередно металлического отражателя и исследуемого образца;

n и ϵ – комплексные значения показателя преломления и диэлектрической проницаемости исследуемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Казанцев, Ю. Н.** Затухание собственных волн в широком волноводе с диэлектрическим покрытием конечной толщины / Ю. Н. Казанцев // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т. 15, № 1. – С. 207–209.
2. **Казанцев, Ю. Н.** Широкие волноводы прямоугольного сечения с малыми потерями / Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин // Радиотехника и электроника. – 1971. – Т. 16, № 6. – С. 1063–1065.
3. **Пименов, Ю. В.** Техническая электродинамика / Ю. В. Пименов, В. И. Вольман, А. Д. Муравцов. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.

Статья поступила 13 марта 2013 г.