



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой радиофизики,
профессор

_____ В.П. Якубов

" 03 " 11 _____ 2000

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Методические указания



Томск – 2000

Указания РАССМОТРЕНЫ И УТВЕРЖДЕНЫ методической комиссией радиофизического факультета



Протокол № 34 от "03" ноября 2000 г.

Председатель методической комиссии радиофизического факультета,

доцент

Г.М. Дейкова

В методических указаниях содержится описание лабораторной работы по потоковому курсу «Волновые процессы» для студентов 3-го курса радиофизического факультета. Даны краткие теоретические сведения и подробное изложение методики выполнения экспериментальной части работы.

Работа может быть использована студентами, аспирантами и специалистами и других специальностей, занимающихся изучением волновых процессов.

Работу подготовил:

доцент Завьялов А.С.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение метода измерения ϵ в свободном пространстве, основанном на “просвечивании” листовых материалов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современной радиоэлектронике используется большое количество различных материалов.

Радиотехническими называют материалы, обладающие определенными свойствами при их взаимодействии с электромагнитным полем и применяемые в технике с учетом этих свойств.

Электрические и магнитные свойства веществ характеризуются комплексными значениями электрической и магнитной проницаемостей

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' = |\epsilon| \exp(i\delta_\epsilon), \quad (1)$$

где $\operatorname{tg}\delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ - тангенс угла диэлектрических потерь,

$$\mu^* = \mu' + i\mu'' = |\mu| \exp(i\delta_\mu), \quad (2)$$

где $\operatorname{tg}\delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'}$ - тангенс угла магнитных потерь. (Зависимость от времени предполагается в виде $e^{-i\omega t}$).

Подавляющее большинство методов измерения электрических и магнитных параметров материалов на СВЧ основано на исследовании распространения электромагнитных волн в среде или волновых процессов на границе раздела двух сред.

Образцы материала, использующиеся при измерениях, как правило, имеют две параллельные плоские границы. Методы, в которых используются плоскопараллельные образцы, можно разбить на три основных группы.

1. Методы, основанные на измерении коэффициента отражения от слоя материала и коэффициента прохождения через слой

материала, относящиеся к квазиоптическим методам измерения параметров в свободном пространстве.

2. Волноводные методы, основанные на измерении полного входного сопротивления отрезка линии с образцом, за которым включается некоторая нагрузка, например, короткое замыкание, четвертьволновой отрезок.
3. Резонаторные методы, для которых в роли непосредственно измеряемых величин выступают резонансные частоты, добротности.

Выбор метода зависит от характера измерений (лабораторные исследования, производственный неразрушающий контроль), диапазона частот, свойств самого материала.

В тех случаях, когда нежелательно разрушать изделие или заготовку из диэлектрика, прибегают к измерениям параметров материалов в свободном пространстве. Методы измерений в свободном пространстве находят широкое применение в миллиметровом диапазоне длин волн.

Волноводные и резонаторные методы являются наиболее точными методами в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн.

Применение этих методов связано с необходимостью изготовления образцов, вписывающихся в поперечное сечение линии или резонатора. В диапазоне миллиметровых волн изготовление и подгонка образцов становятся очень трудоемкими, поэтому предпочтение отдается квазиоптическим методам. Измерения проводятся либо в свободном пространстве, либо в открытых резонаторах.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ – ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Электрические и магнитные параметры (ϵ^* , μ^*) материалов можно определить путем измерения комплексных коэффициентов отражения Γ и прохождения T :

$$\Gamma = |\Gamma|e^{i\varphi_\Gamma}, \quad T = |T|e^{i\varphi_T}. \quad (3)$$

Для диэлектрических материалов достаточно измерить только один комплексный параметр, например T . Коэффициент прохождения может быть найден путем решения граничной электродинамической задачи или методом многократных отражений [1].

При нормальном падении плоской волны на слой диэлектрика

$$T = \frac{1}{\cos kd[2 - i(w' + \frac{1}{w'})\text{tg} kd]}, \quad (4)$$

где d - толщина слоя; $k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon^*}$ - постоянная распространения в слое,

$w' = \frac{W_\epsilon}{W_0} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon^*}}$ - отношение волнового сопротивления материала к

волновому сопротивлению свободного пространства.

Для измерения вещественной составляющей проницаемости материала с малыми потерями достаточно измерить фазу коэффициента прохождения

$$\varphi_T = \arg T, \quad (5)$$

которая после подстановки в формулу (4) значений k и w' принимает вид

$$\varphi_T = \text{arctg} \left(\frac{\epsilon + 1}{2\sqrt{\epsilon}} \text{tg} \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon} d \right). \quad (6)$$

Если не учитывать многократные отражения в листе диэлектрика, можно записать приближенно

$$\arg T \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon} d. \quad (7)$$

При измерении фазы коэффициента прохождения лист диэлектрика помещается между передающей и приемной антеннами (рупорами) измерительной установки, представляющей двухканальный фазовый интерферометр (рис.1).

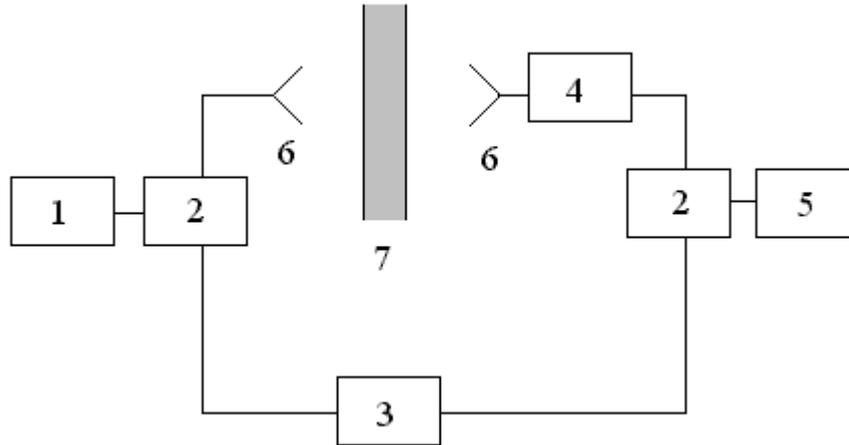


Рис. 1. Схема измерения ϵ в свободном пространстве: 1 – генератор, 2 – разветвитель, 3 – аттенюатор, 4 – градуированный фазовращатель, 5 – индикатор (детекторная секция с микроамперметром), 6 – передающая и приемная антенны, 7 – образец диэлектрика.

Если канал опорного сигнала выполнен в виде достаточно длинного и гибкого кабеля, градуированный фазовращатель может быть заменен устройством, перемещающим приемный рупор вдоль «оптической» оси системы. Перемещение осуществляется плавно с помощью микровинта.

Пусть в отсутствие листа система сбалансирована, т.е. на детектор индикатора поступают сигналы одинаковой амплитуды, но имеющие разность фаз π .

На индикаторе при этом наблюдается минимум показаний. Лист диэлектрика, помещенный между рупорами, вносит дополнительный фазовый сдвиг

$$\Delta\varphi_1 = \arg T - \frac{2\pi}{\lambda_0} d. \quad (8)$$

Для компенсации этого фазового сдвига рупор перемещается в сторону листа на величину Δl . При этом фаза меняется на величину

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l. \quad (9)$$

Из условия баланса системы ($\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$) получаем выражение, связывающее $\arg T$ с измеряемыми величинами:

$$\arg T = \frac{2\pi}{\lambda_0}(d + \Delta l), \quad (10)$$

где $\arg T$ связан с ε соотношением (6). Отсюда

$$\operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon + 1}{2\sqrt{\varepsilon}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon} d\right) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(d + \Delta l). \quad (11)$$

Если воспользоваться приближенным выражением (7), получим формулу для вычисления

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta l}{d}\right)^2. \quad (12)$$

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В отсутствие диэлектрика выбором расстояния между антеннами и поворотом ручки аттенюатора 3 балансируют интерферометр. При хорошо сбалансированном интерферометре точность отсчета фазы будет максимальной.

Для удобства балансировки в измерительный канал вместо фазовращателя 4 вводится еще один аттенюатор. Перекрывают сначала канал опорного сигнала аттенюатором 3. Настройкой детекторной и генераторной секций добиваются максимальных показаний индикаторного прибора. Затем аттенюатором 4 перекрывают измерительный канал, а аттенюатором 3 выводят показания на прежний уровень. Открывают полностью измерительный канал. Теперь, когда амплитуды сигналов практически выравнены, перемещением приемного рупора в пределах $\frac{\lambda}{2}$ меняют фазу сигнала в измерительном канале так, чтобы разность фаз стала равной π . Показания индикаторного прибора при этом будут минимальными.

Если минимум получается недостаточно глубоким, плавным поворотом ручки аттенюатора 3 и перемещением антенны добиваются возможно меньших показаний в минимуме. Замечают показания микрометра I_0 . Далее между передающим и приемным рупорами помещают лист диэлектрика. За счет внесения диэлектрическим листом дополнительного фазового сдвига система разбалансируется. Перемещением приемного рупора в сторону листа добиваются вновь минимальных показаний индикаторного прибора.

Во избежание дополнительных фазовых сдвигов регулировать аттенюаторы уже не следует.

Отсчитывают показания микрометра I_1 при минимуме. Отсчеты I_0 и I_1 для достижения большей точности следует проводить методом “вилки”, замечая показания микрометра при малых, но равных показаниях индикатора и беря среднее из показаний микрометра.

Заметный вклад в погрешность измерения данным методом вносит составляющая, обусловленная люфтом при перемещении приемного рупора. Эту составляющую погрешности можно исключить, если все отсчеты показаний микрометра делать при перемещении приемного рупора в одном направлении.

$$\text{Находят } \Delta I = |I_1 - I_0|.$$

Толщина листа d , необходимая для определения ϵ , измеряется микрометром (штангенциркулем) и берется как среднее из четырех измерений.

Сделав измерения для всех исследуемых диэлектрических листов на ЭВМ, решаем уравнение (11) с использованием программы, приведенной в Приложении 1, и находим ϵ для всех образцов.

4. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Точность одноразовых измерений ϵ этим методом невысока. Как нетрудно убедиться, результаты измерений будут заметно зависеть от положения образца между приемным и передающим рупорами. Это

объясняется тем, что такие факторы, как отражение от образца, сферичность фронта волны, дифракция на краю листа, действуют каждый раз по-разному. Погрешность каждого отдельного измерения, обусловленная переотражениями и дифракционными явлениями, носит систематический характер.

Источником систематических погрешностей при измерении будут в первую очередь многократные отражения от листа диэлектрика и рупоров, влияющие на результат измерения фазы. Обозначим через Γ_{Γ} и Γ_{Π} модули коэффициентов отражения от рупоров, измеряемые в месте расположения листа диэлектрика. При использовании одинаковых рупоров и размещении листа диэлектрика примерно на одинаковых расстояниях от рупоров ($L_1 = L_2$, $|\Gamma_{\Gamma}| = |\Gamma_{\Pi}| = |\Gamma_{\rho}|$) основную составляющую погрешности можно записать в виде [2]:

$$\Delta(\Delta\varphi) \approx |S| |\Gamma_{\rho}| (\sin \psi_1 + \sin \psi_2), \quad (13)$$

где $|S|$ - модуль коэффициента отражения от листа диэлектрика,

$$\psi_1 = \varphi_{11} + \varphi_{\rho} + 2k_0 L_1, \quad \psi_2 = \varphi_{11} + \varphi_{\rho} + 2k_0 L_2,$$

φ_{11} и φ_{ρ} - фазы коэффициентов отражений от листа диэлектрика и рупора, k_0 - волновое число.

Величина $|S|$ зависит от толщины листа и ϵ материала, $|\Gamma_{\rho}|$ - от величины раскрытия рупора, степени согласования рупора с трактом и расстояния до него. Известно, что $|S|$ будет минимальным, если толщина листа кратна целому числу полуволн в диэлектрике. Снизить $|\Gamma_{\rho}|$ при выбранных рупорах можно, увеличивая расстояние между рупором и листом, что приводит к увеличению габаритов установки и требуемого для измерений образца диэлектрика.

Снизить погрешность за счет переотражений можно путем компенсации погрешности по знаку. Знак перед круглой скобкой в выражении (13) будет меняться на обратный, если углы ψ_1 и ψ_2 одновременно изменить на величину π . Такое изменение получается при

смещении листа вдоль оптической оси установки на величину $\frac{\lambda_0}{4}$. При этом фазовый набег (смещение рупора Δl) следует определять как среднее арифметическое из результатов двух наблюдений

$$\Delta l = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{2}. \quad (14)$$

Если установка не позволяет перемещать лист на расстояние $\frac{\lambda_0}{4}$ с достаточной точностью, можно воспользоваться методом рандомизации, т.е. перевести систематическую погрешность в случайную. Для этого следует провести измерения как минимум при четырех положениях листа, отличающихся друг от друга примерно на $\frac{\lambda_0}{4}$. Считая, что переотражения и другие факторы каждый раз действуют по-разному, а их совместное влияние носит случайный характер, результаты измерений можно обрабатывать методами математической статистики.

Измерение ε относится к косвенному виду измерений, когда искомая величина y находится как функция непосредственно измеряемых величин x_i

$$y = f(x_1, x_2, \dots). \quad (15)$$

В случае одной непосредственно измеряемой величины x погрешность измерения y можно найти как

$$\Delta y = f'(\bar{x}) \Delta x, \quad (16)$$

где \bar{x} - среднее значение, Δx - погрешность измерения x .

В роли непосредственно измеряемой величины в данном случае выступает Δl .

Имея ряд результатов измерений Δl_i , рассмотрим порядок их обработки. При статистической обработке необходимо выполнить следующие операции.

1. Вычислить среднее арифметическое результатов наблюдений, принимая за результат измерения

$$\bar{\Delta l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta l_i.$$

2. Вычислить оценку среднеквадратического отклонения результата наблюдения

$$S_{\Delta l} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta l_i - \bar{\Delta l})^2}{n-1}}.$$

3. Вычислить оценку среднеквадратического отклонения среднего арифметического результата измерений

$$S_{\bar{\Delta l}} = \frac{S_{\Delta l}}{\sqrt{n}}.$$

4. По данной доверительной вероятности $P_g = \alpha$, и количеству измерений n найти по таблице коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n}$. Например, при $P_g = \alpha = 0.95$ и $n = 4$, $t_{\alpha n} = 3.2$.

Определить доверительный интервал $\Delta(\Delta l) = t_{\alpha n} \cdot S_{\bar{\Delta l}}$.

5. Определить $\bar{\varepsilon}$ по формуле $\bar{\varepsilon} = \left(1 + \frac{\bar{\Delta l}}{d}\right)^2$.

6. Определить $\Delta\varepsilon$ по формуле $\Delta\varepsilon = 2 \left(1 + \frac{\bar{\Delta l}}{d}\right) \frac{\Delta(\Delta l)}{d}$.

7. Записать результаты в виде $\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \Delta\varepsilon$.

5. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Измерить диэлектрическую проницаемость нескольких образцов диэлектриков.

2. Оценить случайную погрешность измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завьялов А.С., Дунаевский Г.Е. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. Томск, Изд-во ТГУ, 1986, С.24-31, 141-148.

2. Завьялов А.С., Бабина М.Н., Дунаевский Г.Е. Измерение параметров СВЧ трактов. – Томск: Изд-во ТГУ, 1983. С. 70-74, 78-83.

Приложение 1. Решение уравнения (11) в системе Mathcad.

Исходные данные $d := 2.$ $\lambda := 3.2$ $\Delta l := 1.$

Начальное приближение: $\varepsilon := 2.$

Решение уравнения:

Given

$$\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon + 1} \cdot \tan\left[\frac{2\cdot\pi}{\lambda} \cdot (d + \Delta l)\right] = \tan\left(\frac{2\cdot\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sqrt{\varepsilon}\right)$$

Ответ

$$\text{minerr}(\varepsilon) = 2.272$$

Погрешность решения $ERR = 0$