
ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

В. А. Щербов, Е. М. Кулешов, А. И. Горошко

Харьков

Известно, что диэлектрическая проницаемость веществ может быть измерена нахождением оптической толщины исследуемого образца или сдвига фазы СВЧ волны, возникающего при внесении плоско-параллельного образца между приемным и передающим рупорами. При таких измерениях в общем случае фазовый сдвиг волны, вызванный прохождением ее через образец, может соответствовать некоторому целому числу волн m и остаточному фазовому сдвигу $\varphi < 2\pi$.

Для определения целого числа волн, укладываемых в образец, необходимо провести измерения с двумя образцами различной толщины. При этом разность в толщине образцов должна быть меньше длины волны в исследуемом материале, в противном случае определение m по двум образцам невозможно. Следовательно, для выбора этой разности необходимо ориентировочно знать величину диэлектрической проницаемости ϵ исследуемого материала.

В субмиллиметровом диапазоне волн при исследовании материалов с большими ϵ для соблюдения указанного выше условия разность в толщинах образцов может быть весьма малой (единицы микрон). В этом случае изготовление образцов и измерение их оптической толщины могут производиться с такой ошибкой, что число m будет определяться неточно.

В данной работе рассматривается предложенный нами [1] метод измерения ϵ , который не требует специального определения m . Он пригоден также для измерения ϵ неоднородных материалов.

Методика и результаты измерения диэлектрической проницаемости

Блок-схема фазометрической установки, с помощью которой измерялись ϵ , изображена на рис. 1. Сигнал от генератора 1, работающего в непрерывном режиме, разделяется направленными ответвителями на две части и поступает в канал с исследуемым образцом и в опорный канал. Канал с исследуемым образцом содержит калиброванные аттенюатор 3 и фазосдвигатель 4, рупорно-линзовую антенну 5, отрезок пологого диэлектрического лучевода 6 [1], секцию с исследуемым образцом 7, перемещающийся зонд 8, отрезок гибкого волновода ab , модулятор одной боковой частоты 9 с датчиком опорного напряжения 10. Сигнал из этого канала поступает через боковое плечо направленного ответвителя 11 к

смесительному детектору 12. К этому же детектору поступает сигнал из опорного канала, служащий в качестве сигнала местного гетеродина.

В результате гетеродинирования на выходе смесителя выделяются колебания промежуточной частоты, которые усиливаются избирательным

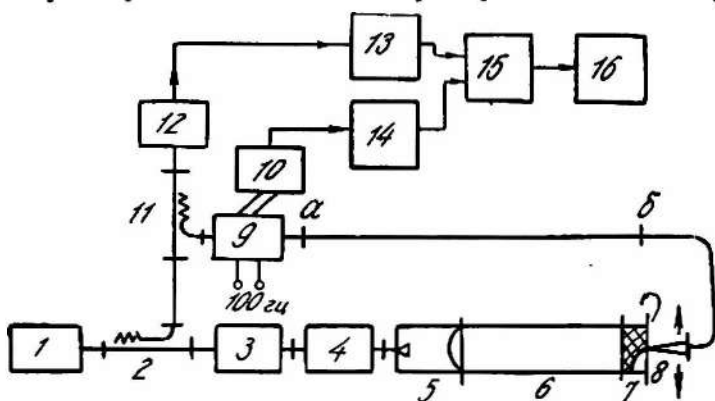


Рис. 1.

усилителем 13 типа У2-4 и поступают к низкочастотному фазометру 15 типа ЭФ-1. В качестве опорного напряжения используется сигнал датчика 10, поступающий к низкочастотному фазометру 15 после усиления усилителем 14. На выходе фазометра выделяется напряжение, пропорциональное фазовому сдвигу между опорным сигналом и сигналом, снимаемым со смесителя 12. Это напряжение поступает на двухкоординатный самописец 16 типа ЭП2К-01, лента которого перемещается синхронно с перемещением зонда. Таким образом, при работе фазометрической установки на ленте самописца вычерчивается фазовая характеристика сигнала на выходе исследуемого образца.

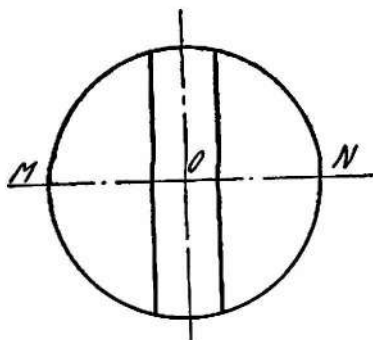
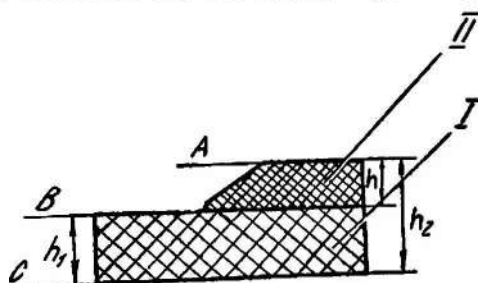


Рис. 2.

При измерениях используется образец специальной формы. На рис. 2 изображен чертеж такого образца, применяемого для определения ϵ неоднородного материала. Цилиндрический участок образца I изготовлен из однородного материала и служит для крепления исследуемого образца из неоднородного материала II. Для однородного материала образец имеет такую же форму, как на рис. 2, но изготавливается сплошным (из одного материала). При измерениях ϵ конец зонда перемещается в плоскости, параллельной основанию цилиндрической части образца на расстоянии 0,5—1 мм от плоскости А.

Результаты измерений ϵ на длине волны 1,6 мм с однородным образцом из полистирола приведены на рис. 3. Измерения проводятся следующим образом:

Результаты измерений ϵ на длине волны 1,6 мм с однородным образцом из полистирола приведены на рис. 3. Измерения проводятся следующим образом:

Результаты измерений ϵ на длине волны 1,6 мм с однородным образцом из полистирола приведены на рис. 3. Измерения проводятся следующим образом:

а) записывается распределение фазы — кривая $ABCDE$ (рис. 3) на выходе лучевода без исследуемого образца;

б) записывается распределение фазы на выходе исследуемого образца — кривая $KLMNO$ (рис. 3).

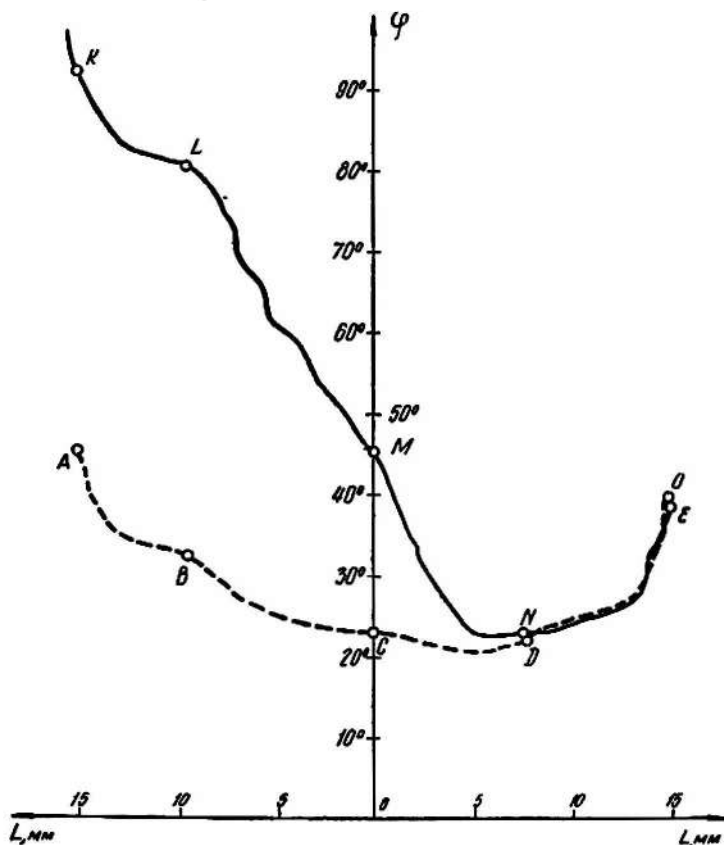


Рис. 3.

При этом предварительно устанавливается начальная фаза фазовращателем 4 (рис. 1) таким образом, чтобы участок фазовой характеристики DE при отсутствии образца совпадал с участком фазовой характеристики NO при наличии образца. На рис. 3 по оси абсцисс отложено расстояние от центра образца в миллиметрах, отсчитанное в плоскости A (рис. 1) вдоль диаметра MN . Разность фаз φ_p , обусловленная изменением толщины образца на величину h , отсчитывалась как разность между участками фазовых характеристик KL и AB . Величина ϵ определяется по известной формуле [2]:

$$\epsilon = \left(\frac{\varphi_p \lambda}{2\pi h} + 1 \right)^2, \quad (1)$$

где $\varphi_p = 2\pi t + \varphi_p'$ — разность фаз, обусловленная изменением толщины образца на величину h (см. рис. 2).

Разность в толщине образца определялась с помощью микрометра. Результаты измерения и расчета образцов из полистирола и фторопласта-4 приведены в табл. 1.

Таблица I

Наименование материала образца	λ , мм	h , мм	φ_p	ϵ
Полистирол	1,6	0,48	66°	2,6
Фторопласт-4	1,6	0,5	48°	2,08

При измерении веществ описанным способом образец нельзя присоединять непосредственно к выходу рупорнолинзовой антенны. Это связано с тем, что фазовый фронт в непосредственной близости от линзы вследствие дифракционных явлений имеет изрезанную форму, что затрудняет сопоставление фазовых характеристик с образцом и в отсутствии его, поэтому образец помещается в конце диэлектрического лучевода (рис. 1) на некотором расстоянии от линзы.

Возможен второй способ измерения ϵ , не требующий снятия фазовых характеристик. Методика измерений ϵ вторым способом заключается в следующем. Образец помещается в секцию вращающегося сочленения. Перед началом измерений конец зонда устанавливается за пределами ступенчатого участка образца на расстоянии 1—2 мм от плоскости А. При этом фиксируются показания высокочастотного фазовращателя и низкочастотного фазометра ЭФ-1. Далее медленно вращают образец вокруг продольной оси до тех пор, пока кончик зонда не перейдет ступенчатый участок образца. При вращении образца необходимо следить за фазой, чтобы можно было отсчитать целые периоды изменения фазы, если такие имеются.

Фазовый сдвиг, происшедший при изменении толщины образца на величину h , отсчитывается по высокочастотному фазовращателю. Расчет величины ϵ проводится по той же формуле (1). Результаты измерений и расчета ϵ различных материалов, вторым способом на длине волн 1,6 мм, представлен в табл. 2.

В этой же таблице приведены результаты измерения ϵ , приведенные другими авторами. Как видно, полученные результаты хорошо совпадают с результатами других авторов.

Анализ погрешностей измерений и их экспериментальное определение

Из формулы (1) видно, что погрешность определения диэлектрической проницаемости веществ зависит от погрешностей измерения разности фаз φ_p , размеров ступеньки h и длины волн λ . Относительная погрешность $\delta\epsilon_1$ из-за ошибки измерения разности фаз (φ_p)

$$\delta\epsilon_1 = \pm \frac{2\lambda\Delta\varphi_p}{\varphi_p\lambda + 2\pi h}. \quad (2)$$

Относительная погрешность $\delta\epsilon_2$ из-за ошибки измерения длины волны (λ)

$$\delta\epsilon_2 = \pm \frac{2\varphi_p\Delta\lambda}{\varphi_p\lambda + 2\pi h}. \quad (3)$$

Относительная погрешность $\delta\epsilon_3$ из-за ошибки измерения размеров ступеньки (h)

$$\delta\epsilon_3 = \pm \frac{\varphi_p\lambda}{(\varphi_p\lambda + 2\pi h)} \frac{\Delta h}{h}, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_p$, $\Delta\lambda$ и Δh — наибольшие абсолютные погрешности в измерении φ_p , λ и h .

Таблица 2

Наименование материала	Результаты данной работы								Результаты других авторов		
	$(\varphi_p)^0$	$h, \text{ мм}$	ϵ	$\delta\epsilon_1, \%$	$\delta\epsilon_2, \%$	$\delta\epsilon_3, \%$	$\delta\epsilon, \%$	$\delta\epsilon', \%$	ϵ	$\lambda, \text{ мм}$	Литература
Фторопласт-4	579	6,0	2,06	$\pm 0,6$	$\pm 0,2$	$\pm 0,04$	$\pm 0,6$	± 1	$2,06 \pm 0,02$	2,3	[1]
	554	5,72	2,05						$2,05 \pm 0,01$	2,14	[2]
									$2,13 \pm 0,09$	2,98	[3]
Винипласт	864	6,02	2,71	$\pm 0,7$	$\pm 0,2$	$\pm 0,05$	$\pm 0,7$	$\pm 1,1$			
	729	4,98	2,73								
Плексигласс	826	6,13	2,58	$\pm 0,6$	$\pm 0,2$	$\pm 0,05$	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	$2,57 \pm 0,02$	2,31	[1]
									2,59	2,51	[4]
									2,56	1,79	[4]
Гетинакс	782	4,0	3,53	$\pm 1,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,1$	$\pm 1,3$	$\pm 1,7$			
Эбонит	800	5,07	2,93	$\pm 0,9$	$\pm 0,3$	$\pm 0,06$	$\pm 0,9$	$\pm 1,7$	$2,76 \pm 0,03$		[1]
									$2,72 \pm 0,2$		[3]
Капролон	636	3,94	2,99	$\pm 1,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,08$	$\pm 1,3$	$\pm 1,8$			
Этилцеллюлоза	856	3,92	3,94	$\pm 1,4$	$\pm 0,3$	$\pm 0,1$	$\pm 1,4$	$\pm 2,3$			
Карболит	463	4,06	2,3	$\pm 0,9$	$\pm 0,2$	$\pm 0,06$	$\pm 0,9$	$\pm 3,5$			

- [1] Е. А. Виноградов, Е. М. Дианов, Н. А. Ирисова. Радиотехника и электроника, 1965, 10.
 [2] F. Sobel, F. L. Wentworth, L. C. Wiltse, IRE Trans, 1961, MTT-9, 65, 512.
 [3] Л. И. Кац, Л. А. Трайтельман. «Изв. вузов, Радиотехника», 2, 143, 1963.
 [4] В. И. Сарафанов. «Успехи физических наук», 55, 1, 127, 1955.

При определении ϵ возникает еще одна погрешность, связанная с тем, что не учтено наличие потерь в материале. Во всех предыдущих рассуждениях под ϵ мы подразумевали его вещественную часть, т. е. считали, что $\epsilon = \epsilon'$. В действительности всегда имеются некоторые потери, поэтому возникает погрешность, связанная с этим допущением. Рассмотрим ее. Известно [3], что с учетом потерь в случае, если выполняется условие $\epsilon'' \ll \epsilon'$, формула для длины волны в диэлектрике имеет следующий вид:

$$\lambda_e \approx \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon'}} \left(1 - \frac{\text{tg}^2 \delta}{8} \right), \quad (5)$$

где δ — угол потерь;

ϵ' и ϵ'' — действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости соответственно.

Подставив выражение для λ_e в формулу (1), получим истинное значение ϵ' с учетом потерь. Прделав несложные преобразования, получим формулу для относительной погрешности в определении ϵ , связанной с пренебрежением потерями:

Таблица 3

$\text{tg} \delta$	0,05	0,1	0,2	0,5
$\delta\epsilon_e$	0,03%	0,75%	1,2%	6,1%

$$\delta\epsilon_e = 1 - \left(1 - \frac{\text{tg}^2 \delta}{8} \right)^2. \quad (6)$$

В табл. 3 приведены результаты расчета этой погрешности для некоторых значений $\text{tg} \delta$.

Просуммировав все рассмотренные погрешности, получим выражение для расчета наибольшей относительной погрешности в определении диэлектрической проницаемости:

$$\delta\epsilon = \delta\epsilon_e \pm \sqrt{\delta\epsilon_1^2 + \delta\epsilon_2^2 + \delta\epsilon_3^2}. \quad (7)$$

Рассмотрим с какой точностью было определено ϵ с учетом погрешностей измерения φ_p , λ и h .

Погрешности измерения φ_p

Нами проведен анализ погрешностей измерения фазы (φ) с помощью фазометрической установки (см. рис. 1), работающей на длине волны 1,6 мм. Однако при измерении ϵ следует учесть еще погрешность, связанную с многократными отражениями между плоскостями оснований образца (рис. 2 плоскости А, В и С) и погрешность, обусловленную отражениями между зондом и образцом. Нетрудно показать, что максимальная абсолютная погрешность в измерении фазы, обусловленная многократными отражениями между плоскостями оснований образца ($\Delta\varphi_s$), может быть определена по формуле:

$$\Delta\varphi_s = \pm \arcsin |\Gamma_g|^2, \quad (8)$$

где $|\Gamma_g|$ — модуль коэффициента отражения от границы диэлектрик — воздух.

Учитывая, что $|\Gamma_g| = \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1}$, получим

$$\Delta\varphi_s = \pm \arcsin \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2. \quad (9)$$

Погрешность $\Delta\varphi_s$ определялась расчетным путем.

Погрешность, связанная с отражениями между зондом и исследуемым образцом ($\Delta\varphi_6$), определялась экспериментально. При определении этой погрешности измерялась разность фаз (φ_p), обусловленная ступенькой образца, по второй методике измерений при различных расстояниях зонда от образца. Максимальное изменение фазы от среднего значения и является погрешностью в измерении разности фаз, обусловленной отражениями между зондом и образцом $\Delta\varphi_{p6}$. Результаты замеров этой погрешности для различных образцов показаны в табл. 4. Среднее значение разности фаз принимаем за истинное.

Таблица 4

ϵ	2,06	2,58	2,71	3,53	2,93	2,99	3,94
$\Delta\varphi_{26}$	$\pm 8^\circ$	$\pm 13^\circ$	$\pm 9^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 14^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 16^\circ$

Рассмотренные погрешности $\Delta\varphi_6$ и $\Delta\varphi_8$ являются систематическими знакопеременными.

Приведем формулы для наибольшей абсолютной погрешности в измерении разности фаз (φ_p), обусловленной ступенькой образца.

При измерении ϵ первым способом (по фазовым характеристикам, см. рис. 3) формула для $\Delta\varphi_p$ имеет следующий вид:

$$\Delta\varphi_p = \pm 2 \sqrt{\Delta\varphi_1^2 + \Delta\varphi_2^2 + \Delta\varphi_{в4}^2 + \Delta\varphi_{н4}^2 + \Delta\varphi_3^2 + \Delta\varphi_4^2 + \Delta\varphi_5^2 + \Delta\varphi_6^2}. \quad (10)$$

При измерении ϵ вторым способом (с поворотом образца), когда фазовый сдвиг определяется по высокочастотному фазовращателю, не возникают погрешности, связанные с переносом фазы на промежуточную частоту, и погрешности, обусловленные низкочастотным фазометром ЭФ-1. Следовательно, формула для расчета наибольшей абсолютной погрешности будет иметь следующий вид:

$$\Delta\varphi'_p = \pm 2 \sqrt{\Delta\varphi_1^2 + \Delta\varphi_{в4}^2 + \Delta\varphi_5^2 + \Delta\varphi_6^2}, \quad (11)$$

где $\Delta\varphi_1$ — погрешность, вызванная паразитной частотной модуляцией СВЧ генератора;

$\Delta\varphi_2$ — погрешность, обусловленная модулятором одной боковой частоты;

$\Delta\varphi_3$ — погрешность связанная с отражениями от детектора;

$\Delta\varphi_4$ — погрешность фазометра ЭФ-1;

$\Delta\varphi_{в4}$ — погрешность высокочастотного фазовращателя.

Все перечисленные погрешности были определены нами экспериментально и по формулам (11) и (12) рассчитывались наибольшие погрешности в измерении разности фаз.

Погрешности измерения λ

На $\lambda = 1,6$ мм максимальная абсолютная погрешность в измерении длины волны определяется погрешностью волномера и составляет $\Delta\lambda \approx \pm 5 \cdot 10^{-3}$ мм.

Погрешность измерения h

Величина ступеньки h (рис. 2) определялась как разность двух размеров: h_1 и h_2 . Максимальная абсолютная погрешность в измерении h определяется погрешностью микрометра и составляла

$$\Delta h = \pm 0,008 \text{ мм.}$$

При определении h возникает еще одна погрешность, связанная с тем, что угол между продольной осью зонда и плоскостями оснований образца может отличаться от прямого на некоторую величину α . Можно показать, что погрешность, связанная с указанным фактором, определяется по формуле

$$\Delta h' = -h \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

где h — величина ступеньки образца, измеренная с помощью микрометра (при $\alpha = 2^\circ$ эта погрешность не превышает 0,003 мм).

Зная наибольшие абсолютные погрешности $\Delta \varphi_p$, $\Delta \lambda$ и Δh , по формулам (2), (3) и (4) рассчитываем значение частных наибольших относительных погрешностей. Далее, по формуле (7) определяется наибольшая полная относительная погрешность в определении ϵ . Результаты расчета погрешностей $\delta \epsilon_1$, $\delta \epsilon_2$, $\delta \epsilon_3$, $\delta \epsilon_4$ при определении диэлектрической проницаемости материалов по второй методике сведены в табл. 1. В этой таблице даны два значения наибольшей погрешности в определении диэлектрической проницаемости веществ: одно $\delta \epsilon'$ — с учетом погрешности, связанной с отражениями между зондом и образцом ($\Delta \varphi_\epsilon$), $\delta \epsilon$ — для случая, когда погрешность $\Delta \varphi_\epsilon$ исключена. При расчете $\delta \epsilon$ и $\delta \epsilon'$ считали, что $\operatorname{tg} \delta < 0,05$, поэтому погрешность $\delta \epsilon_4$ была пренебрежимо мала и не учитывалась.

Для проверки правильности оценки погрешностей при определении ϵ были проведены повторные измерения ϵ для некоторых материалов с использованием других образцов. Как видно из табл. 2, результаты таких измерений для образцов с различными толщинами из фторопласта-4 и винилпласта лежат в пределах точности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. A. Marcatili and R. A. Schmelzger. BSTJ, vol 43, N 4, part 2, 1964.
2. А. А. Брандт. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. Физматгиз, 1963.
3. Техника измерений на СВЧ, т. 2. Изд-во «Советское радио», 1949.