

УДК 621.317.335.3

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

Ю. А. Дрягин, А. Н. Чухвичев

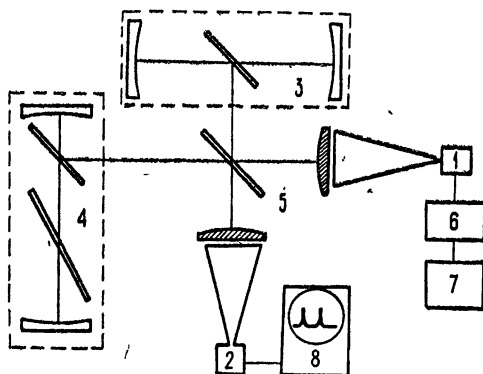
Описывается метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков с помощью интерферометров Фабри—Перо в миллиметровом диапазоне длин волн. Приводятся результаты измерений ϵ' и $\text{tg } \delta$ для ряда материалов.

Свойства диэлектриков в миллиметровом диапазоне изучены еще сравнительно слабо, в литературе имеется ограниченное число работ, посвященных измерению диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. Интерес, проявляемый к миллиметровому диапазону, вызывает необходимость проводить соответствующие измерения. В настоящей работе приводится метод и результаты измерений ϵ' и $\text{tg } \delta$ для ряда твердых диэлектриков.

Для измерений был выбран резонансный метод с использованием открытого резонатора типа интерферометра Фабри—Перо. Блок-схема установки приведена на рис. 1. В качестве генератора миллиметрового диапазона применялась ЛОВ типа ОВ-60022. Для исключения неустойчивости генератора использовались два резонатора: измерительный и опорный; одновременно связанные с генератором и измерительной цепью. Генератор сканировался с частотой сети. Когда частота генератора совпадает с резонансной частотой резонатора, на детектор поступает сигнал и на экране осциллографа, подключенного к детектору.

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:

1—генератор миллиметровых волн с квазиоптической антенной; 2—кристаллический детектор с антенной; 3—эталонный резонатор; 4—измерительный резонатор с образцом; 5—50-процентная делительная пластинка; 6—генератор радиочастоты; 7—частотомер; 8—осциллограф.



будут видны резонансные кривые каждого резонатора. Измерительный резонатор мог перестраиваться по длине с помощью микрометрической подачи. Длина опорного резонатора в процессе измерений не изменялась. Он служил в качестве эталона частоты для определения взаимной расстройки резонаторов, вызываемой внесением в измерительный резонатор образца диэлектрика. Резонаторы образованы круглыми

сферическими зеркалами диаметром 100 мм и радиусом кривизны 1200 мм, расположенными на расстоянии 300—400 мм друг от друга. Для связи резонаторов с генератором и измерительной цепью использовалась тонкая диэлектрическая пленка (тефлон толщиной 5 мк), расположенная под углом 45° к оси резонатора и к падающей волне [1]. Благодаря такой связи моды высших порядков были ослаблены на 25—30 дБ и измерения проводились на основных модах.

В начале измерения длины резонаторов равны. Контролем этого служит совпадение резонансов на любых продольных модах в диапазоне перестройки генератора. При внесении образца в измерительном резонаторе увеличивается оптическая длина пути и изменяется резонансная частота. Измерить изменение резонансной частоты, а следовательно, и ϵ' можно двумя способами: механическим изменением длины измерительного резонатора до восстановления прежнего оптического пути или же методом с дополнительной модуляцией частоты генератора. В последнем случае на экране осциллографа будет виден спектр модулированного по частоте колебания, причем боковые составляющие создадут частотный масштаб, с помощью которого, изменяя частоту модуляции, можно измерить расстройку резонаторов. Лампы обратной волны миллиметрового диапазона имеют большую крутизну электронной перестройки и поэтому без труда могут быть промодулированы с частотой 500 МГц и более. Этого вполне достаточно, чтобы измерять любые частотные расстройки резонаторов, так как на экране осциллографа всегда присутствует более крупный масштаб — соседние продольные моды эталонного резонатора. Расстояние между последними строго постоянно и может быть измерено тем же методом.

Первый способ описан в [2], причем образец для устранения из поля резонатора отраженной волны помещался под малым углом к плоскости, перпендикулярной оси резонатора. В этом случае между поверхностями образца образуется своеобразный резонатор, который создает для проходящей волны дополнительный сдвиг фаз, зависящий от соотношения толщины образца и длины волны. В результате расчет становится крайне громоздким и требует машинного счета. В наших измерениях отраженная волна отсутствовала, так как образец помещался под углом Брюстера*. Вычисляя оптическую длину пути до и после внесения образца в резонатор, нетрудно показать, что

$$\epsilon' = \left(1 + \frac{\Delta L}{d}\right)^2 - 2(1 - \cos \varphi) \frac{\Delta L}{d}, \quad (1)$$

где d — толщина образца, ΔL — изменение длины резонатора для восстановления прежнего оптического пути, φ — угол наклона образца к оси резонатора.

Точность измерения ϵ' определяется добротностью резонатора, которая в нашем случае была достаточно высокой и составляла $(6 \div 8) \cdot 10^5$, однако существующие механические отсчеты вносят дополнительную погрешность (особенно при измерении тонких образцов, когда ΔL мало).

Полностью реализовать точность, обеспечиваемую такой добротностью, позволяет второй способ, где измерение длины заменяется частотными измерениями. В этом случае ϵ' рассчитывается по формуле

$$\epsilon' = \left(1 + \frac{\Delta f L}{df_{\text{рез}}}\right)^2 - 2(1 - \cos \varphi) \frac{\Delta f L}{df_{\text{рез}}}, \quad (2)$$

* Из-за того, что ϵ' неизвестно, угол наклона устанавливался по минимуму потерь в резонаторе (по максимуму отклика)

где $f_{\text{рез}}$ — резонансная частота, на которой проводят измерения, L — длина резонатора, Δf — частотная расстройка,

В работе [2] показана возможность измерения только ϵ' . В настоящей работе резонансный метод применен и для определения потерь в диэлектрике. Для измерения $\text{tg } \delta$ образец также вносили в резонатор под углом Брюстера. Добротность резонатора в этом случае падала только за счет потерь в образце. В этом случае для $\text{tg } \delta$ нетрудно получить выражение

$$\text{tg } \delta = \left(\frac{1}{Q_n} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{L \sqrt{\epsilon' - \sin^2 \varphi}}{d \epsilon'}, \quad (3)$$

где Q_0 и Q_n — добротности резонатора соответственно с образцом и без образца*.

Добротность резонатора определялась измерением ширины резонансной характеристики на экране осциллографа с помощью частотного масштаба способом, подобным описанному в [3]. При измерении потерь в тонких материалах (пленках) добротность резонатора изменяется незначительно; в этом случае для повышения точности добротность резонатора с образцом определялась по отношению максимумов резонансных кривых на экране осциллографа до и после внесения пленки (см., например, [4]).

Для измерений были изготовлены образцы из ряда диэлектриков с размерами 100×200 мм. Измерения проводились на волне 1,8 мм. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Образец	Толщина образца (мм)	ϵ'	$\text{tg } \delta$
Тефлон	5,35	$2,04 \pm 0,04$	$(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$
Полистирол	7,05	$2,53 \pm 0,03$	$(1,1 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$
Полиэтилен	2,8	$2,32 \pm 0,04$	$(2,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$
Кварц плавленный	7,79	$3,8 \pm 0,06$	$(5,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$
Кварц кристаллический	8,82	$4,49 \pm 0,07$	$(2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$
Парафин	5	$2,28 \pm 0,06$	$(4,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$
Оргстекло	1,5	$2,59 \pm 0,08$	$(1,1 \pm 0,06) \cdot 10^{-2}$
Слюда	0,15	$6,56 \pm 0,2$	$(2,3 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$
Лавсан	0,012	$3,2 \pm 0,04$	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$
Полиэтиленовая пленка	0,065	$2,36 \pm 0,12$	$(5,0 \pm 2) \cdot 10^{-3}$
Бумага типографская № 2	0,07	$3,07 \pm 0,14$	$(3,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-2}$

Сравнение полученных значений ϵ' и $\text{tg } \delta$ у плавленного кварца, тефлона, плексигласа с данными измерений других авторов [6] показывает вполне удовлетворительное их совпадение.

Отметим, что указанная в таблице ошибка для ϵ' определяется главным образом погрешностью в определении толщины образца и не отражает предельной точности метода. Измерительная установка позволяет, например, решить обратную задачу: по известной диэлектрической проницаемости определять толщину материала с точностью не хуже 0,5 мк при ϵ' порядка 2—4. Это может быть, по-видимому, полезным для непрерывного контроля толщины пленки при ее производстве.

* Формула справедлива, когда $\text{tg } \delta \ll 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Schulten, *Frequenz*, **20**, 10 (1966).
2. J. E. Degenford, P. D. Coleman, *Proc. IEEE*, **54**, 520 (1966).
3. J. K. Chamberlain, *Electronic Engineering*, **38**, 579 (1966).
4. А. А. Брандт, Исследование диэлектриков на СВЧ, Физматгиз, М., 1963.
5. Е. М. Дианов, Н. А. Ирисова, *ЖПС*, **5**, 251 (1966).

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
30 октября 1968 г.

MEASURING THE PARAMETERS OF SOLID DIELECTRICS IN A SHORTWAVE
REGION OF MILLIMETER BAND BY A RESONANCE METHOD

Yu. A. Dryagin, A. N. Chukhoichev

A method of measuring the permittivity and the loss tangent angle of dielectrics by Fabry Perot interferometers in millimeter range is described. The results of measuring ϵ' and $\text{tg } \delta$ for a number of materials are presented.
