

一种测量复介电常数的新方法—— 电场互相关傅里叶变换法

丁汉屹 张光昭

(中山大学电子系, 广东, 广州, 510275)

摘要: 描述了用电场互相关傅里叶变换技术测量复介电常数的原理和方法, 在8mm波段的测试结果表明, 这种方法具有进行精密测量的能力.

关键词: 复介电常数, 电场互相关, 傅里叶变换.

引言

复介电常数是描述电介质与电磁场相互作用的重要参数之一. 其测量方法可分为频域式和时域式. 频域式包括定向波法, 自由空间无线电波法和谐振法三种类型^[1-3]. 时域式包括利用短脉冲和时域反射仪的瞬态时域法^[4]以及利用色散傅里叶变换光谱仪的稳态时域法^[5]. 时域测量法能给出相当宽的一次性测量频宽, 但一般实验室不具备所需的测量设备和条件. 而频域测量法, 特别是定向波法中的测量线法是一般微波实验室都有条件使用的方法, 因此仍具有其应用价值.

本文所提出的复介电常数测量方法——电场互相关傅里叶变换法是利用电场互相关傅里叶变换波谱仪实现的. 它是一种新的时域测量方法, 可用于整个微波波段, 对35GHz典型介质材料的测量及分析表明, 这种方法对相对介电常数的测量精度可达3~4位有效数字, 损耗角正切的相对测量精度约为10%左右.

1 电场互相关傅里叶变换法的测量原理

图1示出了电场互相关傅里叶变换波谱仪的结构, 其原理详见文献[6], 这里只给出由样品复插入损耗描述的谱仪基本关系式为

$$\begin{cases} \hat{L}(\omega_0 + r\omega_m) = \frac{\hat{P}_{sc}(r\omega_m) - i\hat{P}_{sp}(r\omega_m)}{\hat{P}_{bc}(r\omega_m)}, & (1 \leq r \leq N) \\ \hat{L}(\omega_0 - r\omega_m) = \frac{\hat{P}_{sc}^*(r\omega_m) - i\hat{P}_{sp}^*(r\omega_m)}{\hat{P}_{bc}^*(r\omega_m)}, & (1 \leq r \leq N) \end{cases} \quad (1)$$

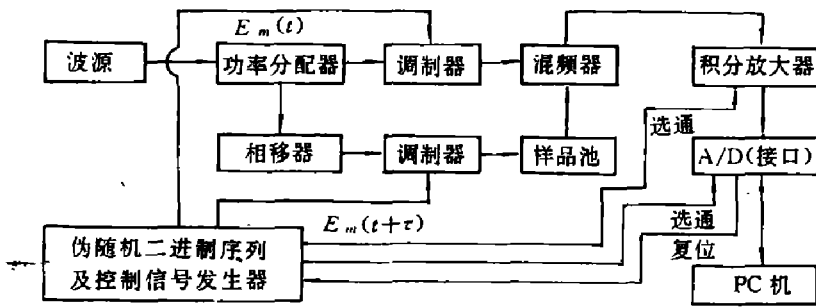


图1 电场互相关傅里叶变换波谱仪结构框图
Fig. 1 Block diagram of the electric-field cross-correlation Fourier transform spectrometer

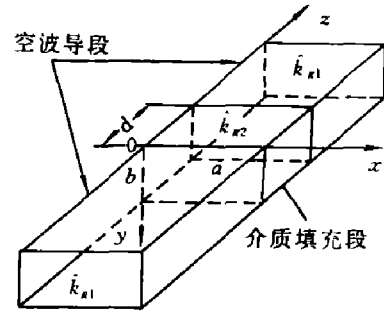


图2 矩形波导、块状样品和坐标
Fig. 2 The rectangular waveguide with a lamellar specimen

式 (1) 中 N 为伪随机序列的位周期, $\hat{P}_{sc}(r\omega_m)$ 和 $\hat{P}_{sp}(r\omega_m)$ 为样品的同相和正交互功率谱, $\hat{P}_{bc}(r\omega_m)$ 为背景的同相互功率谱。

在我们构造的电场互相关傅里叶变换波谱仪中, 样品池是一段标准空波导。在图 2 所示坐标下, 由波导中 TE_{01} 主模的场分布以及电场和磁场具有分界面两侧切向分量连续的特性, 可以导出 TE_{01} 模导行波从媒质 1 进入媒质 2, 在媒质界面上的反射和折射振幅比为

$$\begin{cases} \hat{r}_{12} = \hat{E}_{0r} / \hat{E}_{0i} = -(\hat{k}_{g2} - \hat{k}_{g1}) / (\hat{k}_{g2} + \hat{k}_{g1}), \\ \hat{t}_{12} = \hat{E}_{0t} / \hat{E}_{0i} = 2\hat{k}_{g1} / (\hat{k}_{g2} + \hat{k}_{g1}); \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中使用了波导导行波复波数

$$\hat{k}_g = \left[\left(\frac{\omega}{C} \right)^2 \hat{\epsilon}_r - \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

其中 $\hat{\epsilon}_r = \epsilon_r(1 - i \tan \delta)$ 是媒质的复介电常数, $\epsilon_r, \tan \delta$ 为媒质的相对介电常数和损耗角正切。由媒质 2 进入媒质 1 的反射、折射振幅比 r_{21} 和 t_{21} 为:

$$\hat{r}_{21} = -\hat{r}_{12}, \quad \hat{t}_{21} = \hat{t}_{12} \hat{k}_{g2} / \hat{k}_{g1}. \quad (4)$$

因此波导中厚度为 d 的平行平面块状样品 (见图 2) 两个外表面 x 坐标相同点的合成透射振幅比为

$$\hat{t} = \frac{4\hat{k}_{g1} \hat{k}_{g2} \cdot \exp(-i\hat{k}_{g2} d)}{(\hat{k}_{g1} + \hat{k}_{g2})^2 - (\hat{k}_{g1} - \hat{k}_{g2})^2 \cdot \exp(-i2\hat{k}_{g2} d)}, \quad (5)$$

再根据复插入损耗的定义及波导中的场分布, 则不难导出含有复介电常数 $\hat{\epsilon}_r$ 的导行波波数与复插入损耗的关系

$$\hat{L} = \frac{\hat{t}}{\exp(-i\hat{k}_{g1} d)} = \frac{4\hat{k}_{g1} \hat{k}_{g2} \cdot \exp[-i(\hat{k}_{g2} - \hat{k}_{g1}) d]}{(\hat{k}_{g1} + \hat{k}_{g2})^2 - (\hat{k}_{g1} - \hat{k}_{g2})^2 \cdot \exp(-i2\hat{k}_{g2} d)}. \quad (6)$$

由式 (6) 和式 (3) 得到的关于 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 的两个方程是超越方程, 为了减少求数值解的盲目性, 由不计内部多次反射的复插入损耗 $\hat{L} = L_1 \cdot \exp(-i\psi_1)$, 对 $\tan \delta \ll 1$ 的低损耗媒质可导出一组 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 的近似解:

$$\begin{cases} \varepsilon_r \approx A_4 + (A_1 + \psi_1 / A_3 d), \\ \tan\delta \approx -\frac{2A_5}{A_3 d \varepsilon_r} \ln \left[\frac{L_1 (A_1 + A_5)^2}{4A_1 A_5} \right]; \end{cases} \quad (7)$$

当置入波导中样品两边为空气时:

$$\begin{aligned} A_1 &= (1 - A_4)^{1/2}, \quad A_3 = \frac{\omega}{C}, \quad A_4 = \left(\frac{C}{2af} \right)^2, \\ A_5 &= [(\varepsilon_r - A_4)^2 + (\varepsilon_r \tan\delta)^2]^{1/4}, \\ A_6 &= -\frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\varepsilon_r \tan\delta}{\varepsilon_r - A_4} \right), \\ A_{21} &= A_5 \cdot \cos A_6, \quad A_{22} = A_5 \cdot \sin A_6. \end{aligned}$$

以此解析解作为初值即可大大减小初值选择的盲目性.

2 测量结果及分析

我们用电场互相关傅里叶变换法对两种常见的介质材料: 聚四氟乙烯和有机玻璃的复介电常数进行了测量. 所用的波源为 8mm 体效应振荡器, 其频率为 35.1GHz, 输出功率大于 100mW; 相移器可产生 200° 以上的相移, 以便形成 $\varphi_0 = 0$ 及 $\varphi_0 = \pi/2$ 的工作状态. 使用采样多次平均的技术减少噪声的影响; 另外为减小样品池波导不完全填充引起的系统偏差, 采用补偿公式^[7]:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{rm} b'}{b - \varepsilon_{rm} \cdot (\Delta b)}, \\ \tan\delta = \frac{(\tan\delta)_m b}{b - \varepsilon_{rm} \cdot (\Delta b)}, \end{cases} \quad (8)$$

对所有的结果进行修正. 其中设样品及波导窄边的高度分别为 b' 和 b , $(\Delta b) = b - b'$ 不大; ε_r , $\tan\delta$ 和 ε_{rm} , $(\tan\delta)_m$ 分别是修正后和测量计算出的相对介电常数和损耗角正切.

表 1 相对介电常数及损耗角正切
Table 1 Relative permittivity and loss tangent

样 品	测 量 值		参 考 值 ^[8,9]	
	ε_r	$\tan\delta$	ε_r	$\tan\delta$
聚四氟乙烯	$2.064 \pm .007$	$(9 \pm 1) \times 10^{-4}$	2.08	6×10^{-4}
有机玻璃	$2.667 \pm .002$	$(9 \pm 1) \times 10^{-3}$	$n^2 = 2.663$	7.8×10^{-3}

表 1 列出了聚四氟乙烯 (Teflon) 和有机玻璃 (Plexiglass) 样品的测量结果. 其中 ε_r 和 $\tan\delta$ 的平均值 (包括频段上的平均及样品不同长度测量结果的平均) 用随机标准偏差表示. 从表中可见, ε_r 测量结果与其它波段给出的很接近, 且给出了 3~4 位的有效数字; 对 $\tan\delta$ 的测量, 其数量级也相符, 相对偏差约为 10% 左右, 但具体数值上对衰减很小的样品存在较大偏差, 这是由于噪声等因素影响造成的随机偏差没能很好消除的缘故. 所以

目前的系统主要适合损耗角正切约为 0.01 量级的样品, 待进一步提高信噪比之后, 不仅损耗角正切的相对测量偏差可以降低, 而且可对更小损耗角正切的样品进行测量.

图 3 和图 4 分别为聚四氟乙烯和有机玻璃样品的相对介电常数及损耗角正切的测量谱, 原理上在 $35.100\text{GHz} \pm 1\text{MHz}$ 的频宽内, 对均匀介质而言, 其复介电常数一般是不大可能产生大的变化, 而图中的抖动还是比较大, 其原因主要是随机噪声的影响. 由于直接测量的复插入损耗谱图已反映出随机的起伏, 这种起伏也必然会传递到相对介电常数及损耗角正切的谱中.

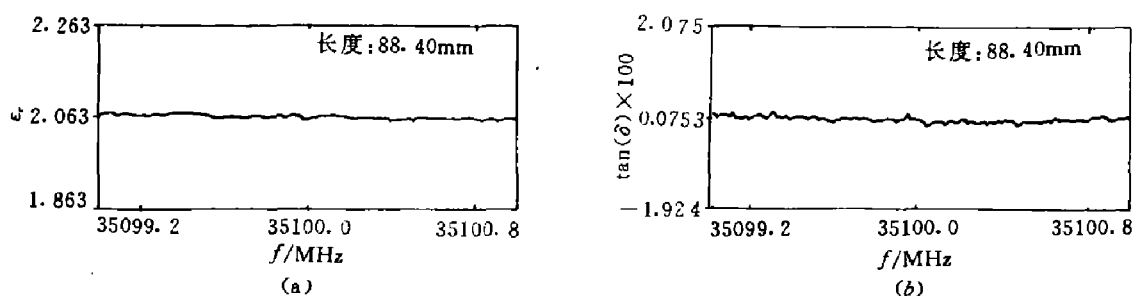


图 3 聚四氟乙烯的相对介电常数谱 (a) 和损耗角正切谱 (b)

Fig. 3 The spectra of the relative permittivity (a) and loss tangent (b) of teflon

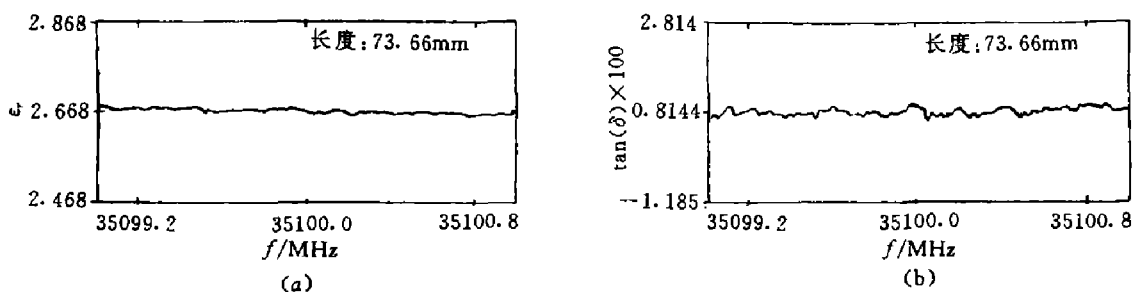


图 4 有机玻璃的相对介电常数谱 (a) 和损耗角正切谱 (b)

Fig. 4 The spectra of the relative permittivity (a) and loss tangent (b) of plexiglass

3 结语

文中所提出的复介电常数的时域测量方法, 可应用于整个微波频段, 具有进行精密测量的潜力. 有关的分析及测量显示, 目前的波谱仪对典型介质复介电常数实部的测量精度可达 3~4 位有效数字; 但对损耗角正切的测量, 相对测量精度还只达到 10% 左右, 系统改进后精度可望提高 3~4 倍.

参考文献

- 1 倪尔瑚. 电介质测量, 北京: 科学出版社, 1981, 20~25
- 2 Redheffer R. in *Technique of Microwave Measurements*, C Montgomery ed., New York: McGraw-Hill, 1947, p.561
- 3 Afsar M, Button K. *Proc. IEEE*, 1985,73:131-153
- 4 Nicolson AM, Ross RF. *IEEE Trans. Instru. Meas.*, 1970,IM-19(4):377-382
- 5 Afsar M, Chantry GW. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1977,MTT-25(6):509-511
- 6 丁汉屹, 李宏, 张光昭. *微波学报*, 1991,(2):1-9
- 7 董树义. *微波测量技术*, 北京: 北京理工大学出版社, 1990, p.5
- 8 Breeden KH, Sheppard AP. *Microwave J.*, 1967, p.59-62
- 9 林清. 中山大学电子系硕士论文, 1989

A NEW METHOD FOR MEASURING COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY WITH AN ELECTRIC-FIELD CROSS-CORRELATION FOURIER-TRANSFORM TECHNIQUE

Ding Hanyi, Zhang Guangzhao

(*Electronics Department, Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China*)

Abstract: A method for measuring complex dielectric permittivity with the electric-field cross-correlation Fourier-transform technique is proposed, and the measured results of complex dielectric permittivity of two typical mediums show that this new method has potentialities to perform precise dielectric permittivity measurements.

Key words: complex permittivity, electric-field cross-correlation, Fourier-transform.