

毫米波准光腔双层介质电介质参数测量新技术*

夏 军^{***} 梁昌洪

(西安电子科技大学电磁场工程系, 陕西, 西安, 710071)

摘要 提出了一种利用毫米波准光腔测量双层介质电介质参数的新技术. 在 8 毫米波段, 建立了一套准光腔测量系统, 并对几种双层介质样品进行了实际测量.

关键词 准光腔, 双层介质, 电介质测量.

引言

介质的电介质参数是科研和工程中常用的重要参量. 在毫米波和亚毫米波波段, 准光腔是精密测量小损耗介质电介质参数的有力工具^[1,2]. 在以往的准光腔测量研究中, 标准被测样品都是单层介质^[3-5]. 但在实际工作中, 经常遇到双层以至多层介质的情况^[6,7]. 出于“无损”测量的需要, 本文利用复数源点理论^[8,9]建立了毫米波准光腔测量双层介质电介质参数的理论模型. 在 8 毫米波段建立了一套准光腔测量系统, 对几种双层介质样品实测结果表明, 这种新技术具有进行精密测量的能力.

1 测量原理

本文选择的是平面-球面镜结构的准光腔(见图 1), 双层介质样品放置在平面镜上. 基于介质测量的目的, 文中只考虑准光谐振腔的基模 TEM_{00q} 形式.

根据复数源点理论^[9], 可以认为在区域 V_i 中存在的高斯波束驻波场是由位于复源点 $(0, 0, z_i - jz_{0i})$ 的一个虚源产生的, 其中 $i=1, 2, 3$. 在区域 V_1 中由于腔关于平面镜的对称性, 则有 $z_1 = 0$. 为了满足各区域的驻波场在边界上的场匹配, 在其相位上增加一个常数因子 Φ_{ci} , 定义

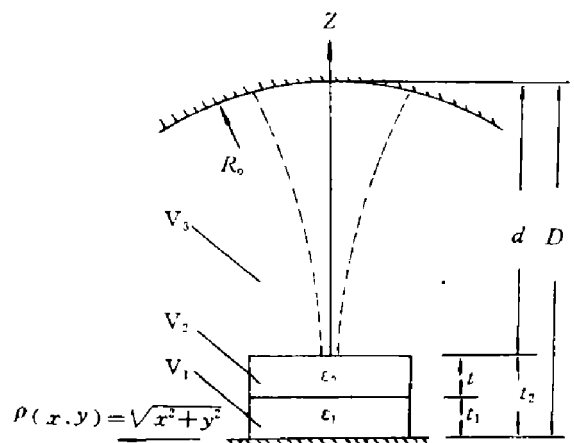


图 1 加载准光腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of quasi-optical resonator with double-layered dielectric sample

* 国家教育委员会博士学科点基金资助项目

^{***} 现在通信地址: 北京理工大学电子工程系, 100081

本文 1993 年 6 月 2 日收到, 修改稿 1993 年 9 月 8 日收到

为匹配相位因子. 则驻波场表达式为

$$E_{xi} = A_i \left(\frac{w_{oi}}{w_i} \right) \exp \left(- \frac{\rho^2}{w_i^2} \right) \sin \left[n_i k z - \Phi_i + \frac{n_i k \rho^2}{2R_i} + \Phi_{ci} \right], \quad (1)$$

$$H_{yi} = j A_i n_i \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{w_{oi}}{w_i} \right) \exp \left(- \frac{\rho^2}{w_i^2} \right) \cos \left[n_i k z - \Phi_i + \frac{n_i k \rho^2}{2R_i} + \Phi_{ci} \right]; \quad (2)$$

式中 A_i 为幅度因子, $k = 2\pi f/c$, $n_i^2 = \epsilon_{ri}$ 为第 i 层介质的相对介电常数. 很显然, 这里表示的电磁场是线性极化的, 只要保证 $(kw_0)^{-2} \ll 1$, 式 (1) 和式 (2) 的结果是成立的^[4].

而波束参数为

$$\left. \begin{aligned} w_i^2(z) &= w_{oi}^2 \left[1 + \frac{(z - z_i)^2}{n_i^2 z_{0i}^2} \right], \\ R_i(z) &= (z - z_i) \left[1 + \frac{n_i^2 z_{0i}^2}{(z - z_i)^2} \right], \\ \Phi_i(z) &= \arctan \left[\frac{z - z_i}{n_i z_{0i}} \right], \\ z_{0i} &= \frac{1}{2} k w_{oi}^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由高斯波束在界面上幅度和相位的径向匹配条件有

$$\left. \begin{aligned} w_i(t_i) &= w_{i+1}(t_i), \\ n_{i+1} R_i(t_i) &= n_i R_{i+1}(t_i). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $i=1, 2$. 将式 (3) 代入式 (4), 计算可得

$$\left. \begin{aligned} w_{01} &= w_{02} = w_{03} = w_0, \\ z_{01} &= z_{02} = z_{03} = z_0, \\ z_2 &= t_1(1 - n_2/n_1), \\ z_3 &= t_1(1 - 1/n_1) + t(1 - 1/n_2), \\ z_0 &= \sqrt{(R_0 - D + z_3)(D - z_3)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

为了满足平面镜和球面镜表面上场的边界条件, 有 $\Phi_{c1} = 0$, $\Phi_{c3} = \Phi_3(D) - kD$. 在区域 V_3 中有 $n_3 = 1$, 为了计算方便, 令 $A_3 = 1$. 由界面上的场匹配可求得

$$n_{i+1} \cdot \tan[n_i k t_i - \Phi_i(t_i) + \Phi_{ci}] = n_i \cdot \tan[n_{i+1} k t_i - \Phi_{i+1}(t_i) + \Phi_{ci+1}], \quad (6)$$

$$A_i = A_{i+1} \cdot \frac{\sin[n_{i+1} k t_i - \Phi_{i+1}(t_i) + \Phi_{ci+1}]}{\sin[n_i k t_i - \Phi_i(t_i) + \Phi_{ci}]}; \quad (7)$$

式中 $i=1, 2$. 设 Q_0, Q_L 分别为准光腔加载前后的品质因数, 定义

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0}, \quad (8)$$

$$Q = \omega W / \sum_{i=1}^2 P_i; \quad (9)$$

式中, $\omega = 2\pi f$, W 为加载腔中的储能, P_i 代表第 i 层介质在一个周期内的平均损耗功率. 将场公式 (1), (2) 代入式 (9) 中计算可得

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^2 \tan \delta_i \cdot n_i^2 A_i^2 \left\{ (t_i - t_{i-1}) - \frac{1}{2n_i k} \sin[2(n_i k t_i - \Phi_i(t_i) + \Phi_{ci})] \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2n_i k} \sin[2(n_i k t_{i-1} - \Phi_i(t_{i-1}) + \Phi_{ci})] \right\} \\ & = \left(\frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} \right) (n_1^2 A_1^2 t_1 + n_2^2 A_2^2 t + d). \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $t_0 = 0$, $\tan \delta_i$ 为第 i 层介质的损耗角正切. 根据式 (6)、(7) 及 (10), 只要已知一层介质的电介质参数, 即可得到另一层介质的电介质参数.

2 实验研究

利用特制的准光腔装置, 在 8 毫米波段建立了一套准光腔扫频测试系统 (见图 2). 准光腔球面镜曲率半径为 139 mm, 口径为 175 mm, 平面镜直径为 84 mm, 腔距的调节精度为 $0.1 \mu\text{m}$. 应用腔距变化法, 分别在不同频率点、不同模式下对几种双层介质样品进行了实际测量, 测量结果与标称值十分吻合.

表 1 给出了一组典型测试数据, 其中 q 为纵轴模数, 第 1 层介质是聚四氟乙烯, 第 2 层介质是平面垂直于光轴的石英晶体. 表 1 中计算第 1 层介质电参数时第 2 层介质电参数取标称值 $\epsilon_{r2} = 4.430^{[10]}$, 由于文献 [10] 未提供石英晶体损耗角正切数据, 损耗角正切由本套系统单层测量获得 $\tan \delta_2 = 0.00013$; 而计算第 2 层介质电参数时第 1 层介质电参数取标称值 $\epsilon_{r1} = 2.052$, $\tan \delta_1 = 0.00025^{[10]}$.

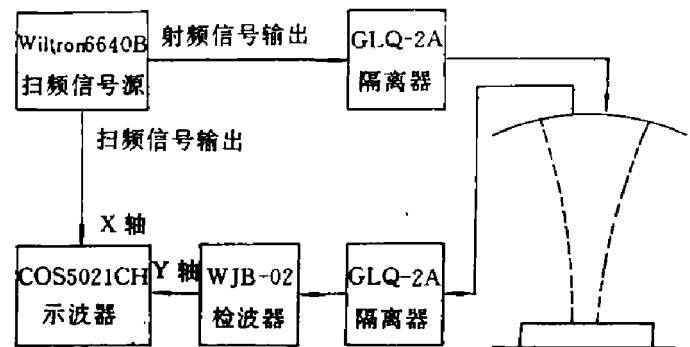


图 2 测量系统结构框图
Fig. 2 Block diagram of the measurement system

表 1 介质电参数测量结果 ($t = 3.97 \text{ mm}$)

Table 1 Measurement results of dielectric samples ($t = 3.97 \text{ mm}$)

f (GHz)	q	$t_1 = 6.04 \text{ mm}$				$t_1 = 4.00 \text{ mm}$			
		ϵ_{r1}	$\tan \delta_1$	ϵ_{r2}	$\tan \delta_2$	ϵ_{r1}	$\tan \delta_1$	ϵ_{r2}	$\tan \delta_2$
34.00	20	2.067	0.00024	4.447	0.00017	2.036	0.00021	4.378	0.00010
	21	2.061	0.00021	4.442	0.00014	2.043	0.00030	4.380	0.00016
35.00	21	2.061	0.00026	4.448	0.00015	2.056	0.00023	4.436	0.00012
	22	2.070	0.00018	4.488	0.00009	2.068	0.00024	4.430	0.00013

3 结语

这项新技术不仅可用于双层介质电介质参数的测量,还可以推广到小损耗的薄膜和液体电介质参数的精密测量,在卫星通信、电波传播、雷达等许多领域,都具有实用价值.

参考文献

- 1 Clarke R N, Rosenberg C B. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1982, **15**(1):9-24
- 2 Afsar M N. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1984, **MTT-32**(12):1598-1608
- 3 Jones R G. *Proc. IEE*, 1976, **123**(4):285-290
- 4 Yu P K, Cullen A L, F R S. *Proc. R. Soc. London Ser. A.*, 1982, **380**(1778):49-71
- 5 Afsar M N, Li X H, Chi H. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1990, **MTT-38**(12):1845-1953
- 6 Wei C, Harrington R F *et al.* *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1984, **MTT-32**(4):439-450
- 7 Medina F, Horno M. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1987, **MTT-35**(11):1002-1008
- 8 Deschamps G A. *Proc. IEEE*, 1972, **60**(9):1022-1035
- 9 Cullen A L, Yu P K. *Proc. R. Soc. London Ser. A.*, 1979, **366**(1725):155-171
- 10 Afsar M N, Button K J. *Proc. IEEE*, 1985, **73**(1):131-153

A NEW TECHNIQUE FOR DIELECTRIC MEASUREMENT OF DOUBLE-LAYERED DIELECTRIC SAMPLES USING A QUASI-OPTICAL RESONATOR AT MILLIMETER WAVE BANDS*

Xia Jun** Liang Changhong

(Department of Electromagnetic Field Engineering, Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A new technique for dielectric measurement of double-layered dielectric samples using a quasi-optical resonator at millimeter wave bands is proposed. At 8 mm band, a set of quasi-optical resonator measurement system was set up, and a number of double-layered dielectric samples were measured.

Key words quasi-optical resonator, double-layered dielectric sample, dielectric measurement.

*The project supported by the Doctoral Foundation of the National Education Committee of China.

**Present address: Department of Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.