

用波动观点在毫米波段测量电介质常数¹

张秉一

(北京邮电大学无线电工程系 北京 100088)

摘 要 本文提出运用于毫米波亚毫米波波段, 高介电常数、低损耗电介质参数的计算及测试方法。介绍了测量原理, 测试系统并给出了测试结果。这一方法精确, 实用, 方便。

关键词 复介电常数, 介质损耗, 开腔

中图分类号 TM934.3

1 引言

测量电介质参数是测量和材料领域中一项比较重要的工作, 它涉及到通信, 雷达, 航天及新材料等领域, 特别是测量高介电常数, 低损耗介质的介电常数更有实用价值。本文从理论及实验两方面确定了 ϵ_r 的单值解, 建立了 8mm 测试系统, 并采用图形、数字处理手段, 综合运用测量及微机优化程序计算了样品的 ϵ_r 及 $\text{tg}\delta$ 值。

2 测试原理

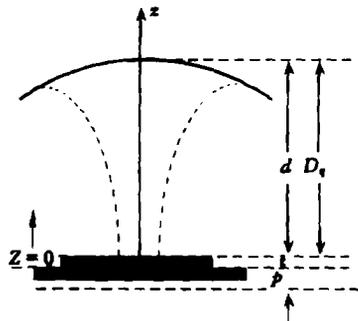


图 1 开腔示意图

2.1 确定 ϵ_r 的单值解 本测试系统选用平-凹开腔(如图 1 所示)。腔中只存在非对称模, 在谐振时波前面与球面反射面重合。测量时选用 TEM_{00q} 主模工作状态^[1]。腔中两个反射面之间有 $(q+1)$ 个驻波的波数, 在谐振频率 f 处, 开腔的谐振长度 D_q 可表示成

$$D_q = \frac{C}{2\pi f} [(q+1)\pi + \text{arc tg}(\frac{D_q}{R_0 - D_q})], \quad (1)$$

此方程的精度为 $(kw_0^2)^{-4}$ 量级^[2]。

由腔中的电磁场结构可推出开腔的谐振条件为

$$\frac{1}{n} \text{tg}(nkt - \psi_t) = -\text{tg}(kd - \psi_d), \quad (2)$$

其中 $d = D_q - t - p$, $\psi_t = \text{arctg}(2t/nkw_0^2)$, $\psi_d = \text{arc tg}[\frac{2}{kw_0^2}(d + d/n^2)] \text{arc tg}(2t/n^2kw_0^2)$, $kw_0^2 = 2[(d + t/n^2)(R_0 - d - t/n^2)]$, $n^2 = \epsilon_r$, 其中 f_0, D_q, p, t 为测量值, 用微机解 (2) 式便可求得 ϵ_r 值, 此方程精度为 $(kw_0^2)^{-4}$ 量级^[2]。

在平-凹腔的近轴, $z = nt$ 区域, 对于曲率半径较大的腔体可用平面波代替高斯波束, 以便分析腔中介质的 ϵ_r 值。在指定的谐振频率下, 选定不同厚度 (t_1, t_2) 的同一种介质插入

¹ 1995-07-24 收到, 1995-12-26 定稿

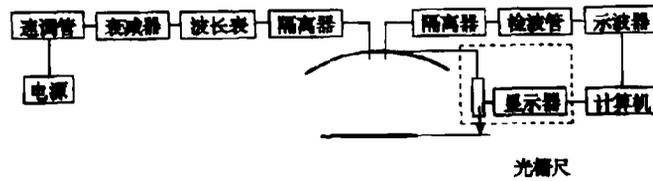


图2 测试系统

表1

名称	厚度 t(mm)	(平均值)		标准差		均值标准差		重复次数
		ϵ_r	$\text{tg}\sigma$	ϵ_r	$\text{tg}\sigma$	ϵ_r	$\text{tg}\sigma$	
HPLTL	10; 8	2.3035	0.000186	0.0011	0.000017	0.0005	0.00008	5
C ₀ -II	5; 4	27.2111	0.00144	0.2876	0.000100	0.1197	0.000045	5

* 此测试结果为鉴定会认可数据

开腔中，使腔体分别谐振在 L_1, L_2 。由于在同一环境条件下，一种介质的 ϵ_r 是唯一的，则有 $n = 1 + \Delta L_1/t_1 + m_1\lambda/(2t_1) = 1 + \Delta L_2/t_2 + m_2\lambda/(2t_2)$ 。由 m_1, m_2 的正整数性质，可解出 m_1, m_2 值，从而求得解集交集中的最小元素便是 ϵ_r 的真值，其精度在 $(kw_0)^{-2}$ 量级。以此作为超越方程 (2) 式的初值在 $(n \pm \sigma)$ 搜索区内迭代解出 ϵ_r 值，其精度在 $(kw_0)^{-2}$ 量级。此方法简单，迅速，准确。

2.2 损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 的计算及测定 依据系统的 Q 值，空腔 Q_0 ，有载 Q_d 的定义，由开腔及介质中的场方程可推导出介质的损耗角正切^[3]：

$$\text{tg}\sigma = \frac{1}{Q_E} \cdot \frac{t \cdot \Delta + d}{t \cdot \Delta + \frac{1}{2K} [\sin 2(nkt - \psi_d)]}, \quad (3)$$

其中 $1/Q_E = 1/Q_d - 1/Q_{lfa}$ ， Q_d 为加入介质后的存储品质因数， Q_{lfa} 为插入理想无损介质的 Q 值， Q_0 为谐振于主模 TEM_{00q} 时，空腔的 Q 值； $\Delta = n^2/[n^2 \cos^2(nkt - \psi_d)] = \sin^2(nkt - \psi_t)$ 。本系统采用点频源变腔长法，相对误差为 $\Delta Q/Q_0$ ，在 10^{-4} 量级。

3 测试系统

测试系统有以下特点：选用国产精制双孔开腔，在 8mm 波段建立一套基于图形及数据处理的点频源测试系统，其球面曲率半径为 142mm，平面镜直径为 80mm，耦合孔直径 1.5mm，壁厚 0.5mm； D_q 在 110 ~ 142mm 之间空腔的 Q_0 在 120000 ~ 160000 之间^[3]。采用光栅测长规探测腔长及腔长变化，分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 。再由 RS-232-C 接口，将测试数据送往微机储存及计算。在检波器后面用高灵敏度示波器，谐振曲线在示波器上显示，以便精选主模，去掉高次模。随后经高线性放大器以 12 位 ADC 采样，储存，数据处理。在微机中显示谐振图形，选出相应的数据点与软件配合进行计算。

4 测试结果

以 $f=36\text{GHz}$ 为例，对具有两种厚度的两种不同材料的样品的重复测试结果如表 1 所示，从测试结果可得以下结论：

- (1) 测试结果与标称值相比 ϵ_r 的不稳定 $<5\%$ ； $\text{tg}\delta$ 的不稳定度 $<20\%$ ，数量级准确。
- (2) 由以上测试数据与标准的数据相比说明本文提出的计算及测试方法正确、可行。

(3) 对具有一般的电介质的 (HPLTL) 参数或具有高介电常数低损耗电介质 (C_0 -II) 的参数, 重复五次测试说明该测试系统重复性好, 其适用范围宽与国外同期技术水平相当^[4]。

(4) 测试系统全部由国产设备组成。稳定可靠, 测试数据准确。

参 考 文 献

- [1] Kogelnite H, Li T. Laser beams resonators. Proc.IEEE 1966, 54(10): 1312-1329.
- [2] Cullen A L, Yu P K. A variational approach to the theory of the open resonator. Proc. Roy. Soc. Lond,1972 A329 133-169.
- [3] Jones R G. Precise dielectric measurements at 35GHz using open microwave resonators. Proc. IEE 1976, 23(123): 285-290.
- [4] Hiroshi Tamura, Dielectric properties of high frequency dielectric at millimeter wave frequencies, 日本毫米波技术及应用全国会议论文集, 日本: 1994, 45-53.

MEASUREMENT OF DIELECTRIC CONSTANT IN THE MILLIMETER-WAVE-BAND

Zhang Bingyi

(*Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088*)

Abstract This paper gives the calculating and testing method for the parameters of materials of low loss and high dielectric constant in the millimeter-wave-band. The measuring principle. and the testing system are introduced. The measuring results are given. This method is precise, practical and convenient.

Key words Double dielectric constant, Dielectric loss, Open resonator

张秉一: 女, 1936年生, 教授, 从事无线电通信与微波技术的研究和教学工作。