

# 用 3 mm 准光腔测试介质片复介电常数

雷 丹 张其劭 李 恩

(电子科技大学微波测试中心,成都 610054)

**文 摘** 为了准确检测介质片在 3 mm 频段的复介电特性,采用固定腔长法,研制了工作在 101.80 GHz 的测试介质片复介电常数准光学谐振腔测试系统。结果表明:腔体的品质因数达  $8 \times 10^4$ ,高斯波束的束腰半径为 2.36 mm。复介电常数的测试范围为  $2 \sim 8$ ;  $\tan \delta$  为  $3 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ ,最可几误差为  $\leq 10\%$ ;  $\tan \delta$  小于等于  $20\% \tan \delta + 1 \times 10^{-4}$ 。此方法能检测大面积介质片复介电常数的均匀性。

**关键词** 准光学谐振腔,介电常数,损耗角正切,品质因数,谐振频率

## 3 mm Quasi Optical Resonator for Measuring Complex Permittivity of Dielectric Materials

Lei Dan Zhang Qishao Li En

(Microwave Center, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

**Abstract** In order to measure accurately complex permittivity of dielectric materials (plate) at 101.80 GHz, a 3mm quasi-optical resonator system by using fixing resonator length method is prepared. The quality factor of the resonator is  $8 \times 10^4$  and the radius of gauss beam is 2.36 mm. The range of measurable complex permittivity is  $2 \sim 8$ ;  $\tan \delta$  is  $3 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ , and the most probable measurement error is  $\leq 10\%$ ;  $\tan \delta$   $20\% \tan \delta + 1 \times 10^{-4}$ . The complex permittivity uniformity of large-area sample can be measured by this system.

**Key words** Quasi-Optical resonator, Permittivity, Loss tangent, Quality factor, Resonant frequency

### 1 引言

近年来随着毫米波、亚毫米波理论和技术研究的发展,准光腔在毫米波、亚毫米波中的应用越来越受到人们的重视,准光腔是精密测量低损耗介质复介电常数的有力工具<sup>[1]</sup>。低损耗介质的复介电参数是科研和工程中常用的重要参量。本文设计和制作了工作在 101.80 GHz 下的开放式谐振腔测试装置,此方法能检测大面积介质片复介电常数的均匀性。

### 2 测试原理

图 1 为球面镜和平面镜组成的半对称谐振腔示意图。

意图。

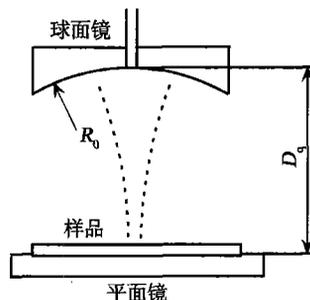


图 1 准光学谐振腔示意图

Fig 1 Schematic of quasi-optical resonator

收稿日期: 2005 - 10 - 23

作者简介: 雷丹, 1978 年出生, 硕士研究生, 主要从事电磁场与微波技术、微波测试等方面的研究工作

准光学谐振腔由一球面镜和一平面镜构成,其中一平面镜与移动装置相连,球面镜上有耦合孔。通过测量空腔和加载薄膜样品后谐振频率的变化以及腔体品质因数  $Q$  值的变化,计算介质片的介电常数和损耗角正切。准光腔中高斯波束的束腰半径为 2.36 mm,调节移动装置,可实现对大样品的扫描测试,从而得到介质片复介电常数的分布。

谐振腔的尺寸远远大于光波波长,并且在傍轴条件下,腔内场的分布是某种形式的高斯光束<sup>[2]</sup>。当能量从耦合孔进入腔体,激励准光腔内存在的多种模式,由于  $TEM_{00q}$  模式有最大的谐振峰值,所以把它作为主模,当谐振腔长  $D_q$  满足下列条件时腔体谐振<sup>[3-4]</sup>:

$$f_{00} = \left[ (q+l) + \frac{2q+l+1}{2} \arctan\left(\frac{D_q}{R_0 - D_q}\right)^{1/2} \right] \frac{c}{2D_q} \quad (1)$$

式中,  $f_{00}$  是空腔的谐振频率,  $D_q$  为谐振腔的腔长,  $R_0$  为球面镜的曲率半径,  $p, l, q$  为  $TEM_{p,l,q}$  的谐振模式,  $q+l$  为半波数。本系统采用高斯波束的基膜,  $p=l=0$ 。

对于反射式谐振腔<sup>[5]</sup>,空腔的品质因数为:

$$Q_{00} = (1 + \alpha) Q_{01} \quad (2)$$

$$Q_{01} = f_{00} / \Delta f \quad (3)$$

式中,  $\Delta f$  为 3 dB 带宽对应的频率差,  $\alpha$  为波导和谐振腔的耦合系数,  $Q_{00}$  为空腔无载品质因数,  $Q_{01}$  是空腔有载品质因数。

当把厚度为  $t$  的样品放在平面镜上,谐振腔的谐振频率和无载品质因数会发生改变。在确定的谐振腔长下,根据置入样品后谐振腔的谐振频率  $f_{0s}$ ,计算出样品的相对介电常数。

相对介电常数计算公式:

$$\frac{1}{n} \cdot \tan(nkt - \epsilon_i) = -\tan(kd - \epsilon_d) \quad (4)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数;  $n = \sqrt{\epsilon_r}$  为样品的折射率;

$$\epsilon_i = \arctan\left(\frac{t}{n\epsilon_0}\right); \quad \epsilon_d = \arctan\left(\frac{d}{\epsilon_0}\right) - \arctan\left(\frac{t}{n^2\epsilon_0}\right);$$

$$d = D_q \sqrt{1 - t^2/R_0^2}; \quad \epsilon_0 = \sqrt{d(R_0 - d)}; \quad d = d + \frac{t}{n}.$$

$\epsilon_0$  为束腰半径:

$$\epsilon_0^2 = \frac{2}{k} \left[ (d + t/n^2)(R_0 - d - t/n^2) \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\tan \epsilon_i = \frac{1}{Q_e} \cdot \frac{t+d}{t + \frac{1}{2k} [\sin 2(kd - \epsilon_d)]} \quad (6)$$

$$\text{式中, } \frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_{0s}} - \frac{1}{Q_1}; \quad Q_1 = Q_{00} \frac{2(t+d)}{D_q(1+l)};$$

$$= \frac{n^2}{n^2 \cos^2(knt - \epsilon_i) + \sin^2(knt - \epsilon_i)}$$

由相对介电常数、空腔无载品质因数  $Q_{00}$  和置入样品后的无载品质因数  $Q_{0s}$ ,代入上述方程组即可求得损耗角正切值  $\tan \epsilon_i$ 。

### 3 测试系统

待测材料的介电常数和损耗角正切分别与加载样品前后的谐振频率和  $Q$  值变化有关。准光腔技术测量低损耗材料的精度很大程度上取决于  $Q$  值的测量精度。测量腔体谐振参数的方法有固定频率法和固定腔长法,长度测量的精确度和分辨率均比频率的测量精确度低,因此选择固定腔体的几何尺寸,用测量谐振频率的方法确定腔体谐振参数值。

测试用的 3 mm 准光腔系统,球面镜的口径为 72 mm,曲率半径为 40 mm,腔长为 39.1 mm,固定在支架上。平面镜的口径为 100 mm,固定在一个三维移动平台上。球面镜的中央设计了一个直径为 1 mm 的耦合小孔。球面镜和平面镜的基体材料是光学玻璃,达到光学级,表面镀了厚度为 1  $\mu$ m 的银膜。

测试系统的框图如图 2 所示:频率综合扫频源出来的信号被倍频器倍频后,经过定向耦合器,波导中传输的波通过耦合小孔进入光学谐振腔;调节移动装置,使平面镜严格同轴,调节谐振腔长使其谐振,使谐振腔反射出来的信号进入检波头,最后进入标量网络分析仪,得出谐振曲线,从而得到腔体的  $Q$  值。

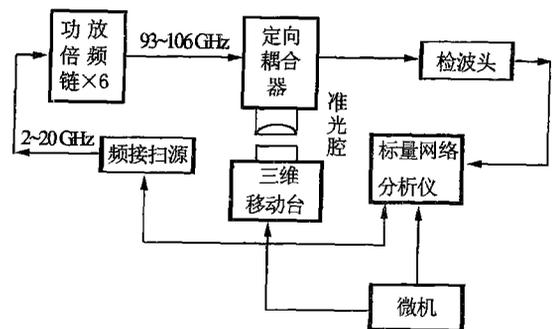


图 2 测试系统框图

Fig 2 Schematic graph of test system

### (1) 谐振频率的确定

当频率综合扫频源出来的信号被倍频器倍频后,其频率范围为 93 ~ 106 GHz。在这个频率范围内由 (1) 式计算出空腔的谐振模式及对应的  $f_{00}$  值以及 (7) 式可得束腰半径  $r_0$ , 具体数值如表 1 所示。

表 1 空腔测试频率<sup>1)</sup>

Tab 1 Measurement frequencies of unloaded resonator

谐振模式	$f$ (理论值) /GHz	$r_0$ /mm	$f_{00}$ (实测值) /GHz
TEM <sub>0022</sub>	89.90	2.51	-
TEM <sub>1022</sub>	93.37	-	93.66
TEM <sub>0023</sub>	93.74	2.46	94.05
TEM <sub>1023</sub>	97.20	-	97.51
TEM <sub>0024</sub>	97.57	2.41	97.90
TEM <sub>1024</sub>	101.04	-	101.35
TEM <sub>0025</sub>	101.40	2.36	101.80
TEM <sub>1025</sub>	101.87	-	105.20
TEM <sub>0026</sub>	105.24	2.32	105.60

注: 1) 测试温度为 24 °C; 湿度为 53 %。

实际测试中,在标量网络分析仪上看到 8 个谐振峰,但选择哪一点作为要测试的频率点,需考虑倍频器在该频率点的最大输出功率和定向耦合器在该点的方向性系数。通过实验比较发现,当工作模式  $f_{00} = 101.80$  GHz 时,倍频器接近最大输出功率,而且定向耦合器有最大方向性系数。所以在整个测试系统中,选择 TEM<sub>0025</sub> 作为空腔的工作模式。

### (2) TEM<sub>00q</sub> 主膜的确定

在平面镜上放一圆形的吸收材料薄膜,薄膜中心有一小孔,在标量网络分析仪上,发现在 101 GHz 点附近,谐振曲线除了  $f_{00} = 101.80$  GHz 这个点的谐振峰衰减得很小外,其他频率的谐振峰全部消失,根据不同模式腔中场的分布,可以知道  $f_{00} = 101.80$  GHz 是主膜 TEM<sub>0025</sub>。

### (3) $q$ 的确定

将  $f_{00} = 101.80$  GHz 和  $D_q = 39.1$  mm、 $R_0 = 40.00$  mm 代入 (1) 式,可得  $q = 25$ 。

### (4) 准确确定 $D_q$

$D_q = 39.1$  mm 是理论值,在实际腔体装配中存在偏差。通过实际测得空腔的谐振频率  $f_{00} = 101.80$  GHz 和  $q = 25$  以及  $R_0$ , 解超越方程 (1), 可得  $D_q$  的准确值为 38.9627 mm。

宇航材料工艺 2006 年 第 2 期

## 4 测试结果与讨论

首先测试空腔的谐振频率和品质因数,移动三维平台,使高斯光斑打在平面镜不同点处,测得不同点处腔体的  $f_{00}$  和  $Q_{00}$ ; 然后将厚度为  $d$  的样品放在平面镜的中心,记录样品正中心的谐振频率  $f_{0s}$  和无载品质因数  $Q_{0s}$ 。移动三维平台,使高斯光斑打在样品不同点处,测得不同点处腔体的  $f_{0s}$  和  $Q_{0s}$ , 根据超越方程 (4) 式和 (11) 式计算出不同点处的  $\tan \delta$  和  $\tan \delta_c$ , 从而获得测试样品的  $\tan \delta$  分布,常温下的测试结果如表 2 所示。

表 2 石英片测试结果<sup>1)</sup>

Tab 2 Measurement results of loaded resonator with quartz plate

$f_{00}$ /GHz	$Q_{00}$	$f_{0s}$ /GHz	$\tan \delta$	$\tan \delta_c / 10^{3/4}$
101.81	80700	99.95	3.83	4.9
101.81	80700	99.95	3.83	4.3
101.81	80800	99.95	3.82	3.0
101.81	80700	99.95	3.82	3.0
101.81	80800	99.95	3.81	4.8
101.81	80700	99.95	3.81	4.2
101.81	80700	99.95	3.81	4.8
101.81	80700	99.95	3.81	3.6
101.81	80700	99.95	3.81	3.6
101.81	80700	99.95	3.82	4.2
101.81	80800	99.96	3.78	3.5
101.81	80700	99.95	3.82	3.6
101.81	80700	99.95	3.81	4.2
101.81	80700	99.95	3.81	3.0
101.81	80800	99.95	3.80	3.6
101.81	80700	99.96	3.80	2.9
101.81	80700	99.96	3.80	4.8
101.81	80700	99.96	3.79	4.2
101.81	80700	99.96	3.79	3.6
101.81	80700	99.96	3.78	4.2

注: 1) 厚度  $d = 0.64 \sim 0.65$  mm; 直径  $\phi = 50$  mm; 测试温度为 24 °C; 湿度为 56 %。

从表 2 中极易看出空腔的无载品质因数在所有点均大于 80 000, 这保证了复介电常数的准确测试。测试中的误差源包括:  $D$ ,  $t$ ,  $f_{00}$ ,  $Q_{00}$ ,  $f_{0s}$ ,  $Q_{0s}$ 。另外影响测试结果的因素还有: (1) 样品的平行度与粗糙度不易保证, 加上准光学谐振腔表面镀银的氧化与不光滑, 会使损耗增加; (2) 组成测试系统各

仪器的精度、各部件之间的可靠连接以及波导与准光学谐振腔之间的耦合程度大小；(3)环境的温度对复介电常数的影响。经过对方程(1)~(14)采用误差递推、误差源采集和用方差根进行误差分析后发现,当样品的厚度 $t$ 较小时, $t$ 将是主要的误差源。经实际测量,本测试系统所能测量的复介电常数的测试范围 $\epsilon = 2 \sim 8$ ;  $\tan \delta = 3 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ ,测试系统的最可几误差为 $\epsilon / 10\%$ ;  $\tan \delta = 20\% \tan \delta + 1 \times 10^{-4}$ 。

## 5 结论

本文设计并制作了工作在101.8 GHz频率下,准光学谐振腔测介质片复介电常数的测试系统。在常温下对测试样品的复介电常数进行了测试研究,空腔的无载品质因数在所有点均大于80 000,对该测试系统产生的误差进行了较为全面的分析。本测试系统所能测量的复介电常数的测试范围 $\epsilon = 2 \sim 8$ ;  $\tan \delta = 3 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ ,测试系统的最可几

误差为 $\epsilon / 10\%$ ;  $\tan \delta = 20\% \tan \delta + 1 \times 10^{-4}$ 。测试结果表明这种方法是行之有效的,准光学谐振腔法具有不损伤薄膜、灵敏度高,并能检测大面积介质片复介电常数均匀性的优点。

## 参考文献

- 1 夏军,梁昌洪.毫米波准光腔双层介质电介质参数测量新技术.红外与毫米波学报,1994;13(4):285~288
- 2 张克潜.微波与光电子学中的电磁理论.北京:电子工业出版社,1994:570~573
- 3 Cullen A L, Yu P K. The accurate measurement of permittivity by means of an open resonator. In: Proc. Royal Soc. London, Vol A325, 1971: 493~509
- 4 Cullen A L, Nagenthiram P, Williams A D. Improvement in open resonator permittivity measurement. Electron Lett, 1972; 8(23): 577~592
- 5 周清一.微波测量技术.北京:国防工业出版社,1964:204~206

(编辑 李洪泉)

## 火灾自动报警装置

本成果利用镭-241放出的 $\alpha$ 射线,使局部空气电离,在电场的作用下形成离子电流;当火灾早期产生的烟雾进入电离室时,离子电流就发生变化,仪器立即将其转换成报警信号,准确地向值班人员或者消防部门报警火灾发生的时间和地点。若将信号与自动灭火装置相连接,便可实现自动灭火。

本成果系列火灾自动报警装置有:离子感烟探测器、膜合感烟探测器、双金属片感温探测器、区域报警器及集中报警器。而离子感烟探测器灵敏度最高,可在物质隐燃尚未酿成火灾时,发出报警信号。

该成果性能指标接近世界先进水平。曾获国家银质奖。本成果已在北京饭店等宾馆饭店及全国数百个单位安装使用,运行情况和使用效果良好。其经济、社会效益难以估计。

(核工业总公司 262厂,北京 100045)

## 高压水射流切割技术

由于固体火炸药有着较高的冲击与摩擦感度,采用机械切削和人工铲挖方法,从金属壳体内清除报废的固体推进剂或炸药,具有很大危险性,有时受金属壳体结构的限制,难以施工。

高压水射流作为一种新兴的工艺技术,有其独特的优点:加工中无粉尘、无切削热、无静电,是清除报废的固体推进剂或炸药的一种理想的工艺方法,从而使经过热试车后的固体发动机的金属壳体能够得到重复使用。本成果利用普通水为工质,泵压为25~35 MPa,流量为80 L/min,靶距为20 mm,喷嘴移动速度为25 mm/s时,对复合推进剂的切割深度可达50 mm以上,并可切除其它橡胶类物质。

本成果是一种安全、经济、高效的工艺方法,解决了固体发动机研制生产中的一大难题。此工艺属国内首创,具有先进性,有推广应用价值。本成果可推广应用于航空、兵器、船舶、机械、化工等行业容器的表面处理。本成果的经济效益和社会效益十分显著。

(北京动力机械研究所,北京 100074)

·李连清·

宇航材料工艺 2006年 第2期