

# 高 Q 腔法测试透波材料毫米波复介电常数

吴超<sup>1</sup> 李恩<sup>1</sup> 郭高凤<sup>1</sup> 何凤梅<sup>2</sup>

(1 电子科技大学, 成都 610054)

(2 航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室, 北京 100076)

**文 摘** 介绍了透波材料毫米波复介电常数自动测试方法, 采用高 Q 腔一腔多模扫频(18~40 GHz)方法测试了微波低损耗圆盘状介质材料, 谐振腔工作在  $TE_{10p}$  模式, 电场的极化方向平行于样品表面。为适应毫米波段材料测试的要求, 在设计测试用宽频高 Q 值谐振腔时, 改变以往工作中腔壁开槽位置以抑制  $TM_{1mn}$  简并模, 对测试用谐振腔的设计大大减小了测试误差。用此系统对几种低损耗材料进行测量, 结果证明谐振腔有效抑制了干扰模式, 减小了测试误差。对测试结果进行了误差分析, 系统的最可几测试误差为:  $|\Delta\varepsilon_r/\varepsilon_r| = 2\%$ ;  $|\Delta\tan\delta| = 10\% \tan\delta + 5 \times 10^{-5}$ 。

**关键词** 圆柱谐振腔, 复介电常数, 微波测试

## Millimeter Wave Complex Permittivity Measurement for Low Loss Dielectric Disks by High Q Resonance Cavity Method

Wu Chao<sup>1</sup> Li En<sup>1</sup> Guo Gaofeng<sup>1</sup> He Fengmei<sup>2</sup>

(1 University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

(2 National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials Technology, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The complex permittivity of low loss microwave dielectric disk was measured by applying high Q factor cylindrical cavity working in multimode. The cavity worked in  $TE_{10p}$  mode, the polarization direction of electric field was parallel to the plane of the disk. Because of high measurement frequency, we displaced the groove which separated resonant frequency of the degenerating  $TM_{1mn}$  mode to the upper end plate of the cavity and decreased the groove between dielectric disk and cavity wall. As a result, the error of measurement is greatly decreased. The complex permittivity of several kinds of low-loss material were measured by using this method mentioned in this paper. The results were satisfactory. The maximum random error:  $|\Delta\varepsilon_r/\varepsilon_r| = 2\%$ ;  $|\Delta\tan\delta| = 10\% \tan\delta + 5 \times 10^{-5}$ .

**Key words** Cylindrical cavity, Complex permittivity, Microwave measurement

### 0 引言

低损耗材料被广泛应用于制造雷达天线罩, 其电性能直接影响天线罩的透波率和天线的瞄准精度, 描述透波材料的基本参量是复介电常数, 因此透波材料复介电常数的精确测量对于雷达天线罩的设计有着重要意义<sup>[1~2]</sup>。

考虑到所测材料极化方向平行于样品表面, 采用电场方向平行于样品表面的  $TE_{10p}$  模式为工作模式; 考虑到极低的损耗角正切 ( $\tan\delta < 0.01$ ) 的测试要求, 对低介电常数、低损耗的材料进行测量; 由于对长度

的测量精度远不及对频率的测量精度, 采用定长度一腔多模谐振腔。

### 1 测试原理

应用“固定谐振腔长度, 改变谐振频率的一腔多模”的方案, 其测试原理的物理模型如图 1 所示。

系统 1 为未置入试样的空腔, 腔长为  $L$ , 直径为  $D$ , 对  $TE_{01n}$  模式有谐振频率  $f_{00}$  和它们各自的无载品质因数  $Q_{00}$ 。

系统 2 为同一空腔中置入厚为  $d$  的试样, 它的复介电常数为  $\varepsilon'$  和  $\tan\delta$ , 此情况下有无载品质因数  $Q_{0c}$ 。

收稿日期: 2008-09-20

作者简介: 吴超, 1981 年出生, 硕士研究生, 主要从事介质材料微波、毫米波电性能测试。E-mail: wuchao811110@163.com

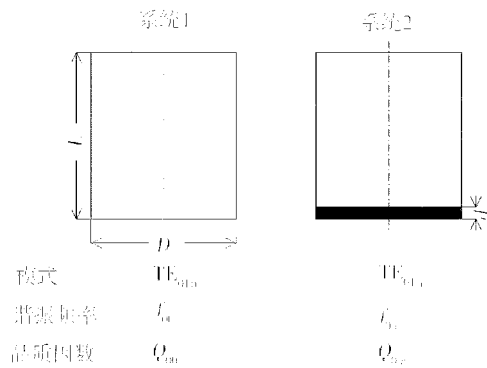


图1 定长度变频一腔多模物理模型

Fig.1 Model of length-obtained cavity working in multimode

参照 GB/T5597—1999<sup>[2~3]</sup>, 可以导出如下方程。

对系统1有:

$$(f_0 D)^2 = \left(\frac{c}{\pi} X_{01}\right)^2 + \left(\frac{cn}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{L}\right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{Q'_{00}} = \frac{1}{Q_{00}} \left(\frac{f_0}{f_{0\epsilon}}\right)^{\frac{5}{2}} \cdot \frac{\left(\frac{2X_{01}}{D}\right)^2 (pv + u) + D(p\beta_\epsilon^2 + \beta_0^2)}{(pv\epsilon' + u) \left[\left(\frac{2X_{01}}{D}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{D}{L}\right) + \left(\frac{2\pi f_0}{c}\right)^2 \cdot \frac{D}{L}\right]} \quad (6)$$

$$p = \left[\frac{\sin\beta_0(L-d)}{\sin\beta_\epsilon d}\right]^2 \quad (7)$$

$$u = 2(L-d) - \frac{\sin 2\beta_0(L-d)}{\beta_0} \quad (8)$$

$$v = 2d - \frac{\sin 2\beta_\epsilon d}{\beta_\epsilon} \quad (9)$$

测得空腔无载品质因数  $Q_{00}$  和置入试样后测试腔的无载品质因数  $Q_{0\epsilon}$ , 代入上述方程组即可求得  $\tan\delta$ <sup>[3~4]</sup>。

## 2 谐振腔的设计

圆柱谐振腔是测试系统中的关键部件, 其性能直接影响测量精度。圆柱谐振腔中的高次模式和兼并模式对测试结果有较大影响。由于本文使用的是定长度一腔多模谐振腔, 腔中可存在 TM 模和 TE 模, 多种模式的存在对测量有较大的影响, 需要合理设计谐振腔, 以使谐振腔的工作模式 TE<sub>01p</sub> 有足够高的品质因数且易于识别。

由于 TE<sub>01p</sub> 模式具有众多的干扰模式, 还有简并模式, 它们如果与 TE<sub>01p</sub> 模式的频率十分接近, 将影响 TE<sub>01p</sub> 模式谐振频率确定。这就需要进行腔体尺寸 ( $D/L$ ) 优化, 使 TE<sub>01p</sub> 模式的谐振频率与两边相邻模式的谐振频率离得尽量远<sup>[5]</sup>。

谐振腔中的另一种干扰模式是 TM 模。由于工

对系统2有:

$$\beta_\epsilon^2 = \left(\frac{2\pi f_{0\epsilon}}{c}\right)^2 \epsilon' - \left(\frac{2X_{01}}{D}\right)^2 \quad (2)$$

$$\beta_0^2 = \left(\frac{2\pi f_{0\epsilon}}{c}\right)^2 - \left(\frac{2X_{01}}{D}\right)^2 \quad (3)$$

$$\frac{\tan\beta_\epsilon d}{\beta_\epsilon} + \frac{\tan\beta_0(L-d)}{\beta_0} = 0 \quad (4)$$

式中,  $X_{01}$  为贝塞尔函数的根,  $\beta_0$ 、 $\beta_\epsilon$  为圆柱谐振腔的空气部分和加载介质部分的传播常数, 其中  $D$ 、 $n$ 、 $X_{01}$  以及光速  $c$  为已知, 测得  $f_0$  求得  $L$ , 测得  $f_{0\epsilon}$  即可求得  $\beta_0$ , 解以上超越方程(3)~(4)可求得  $\beta_\epsilon$ , 从而求得  $\epsilon'$ 。

系统2中根据场的储能和耗能的关系可以求得:

$$\tan\delta = \left(1 + \frac{u}{pv\epsilon'}\right) \left(\frac{1}{Q_{0\epsilon}} - \frac{1}{Q'_{00}}\right) \quad (5)$$

式中:

作模式 TE<sub>01p</sub> 模流过谐振腔圆柱壁的电是环向的, 而 TM 模的电流是轴向的, 所以采用在圆柱谐振腔腔壁上开槽的方法来切断 TM 模的壁电流以滤除 TM 干扰模式<sup>[6~7]</sup>, 并在腔体末端放置吸波材料吸收 TM 模式的能量。

以往工作中, 用放置样品用的活塞和腔壁之间的缝隙实现腔壁上的开槽[如图2(a)所示], 样品跟墙壁间缝隙会引入误差, 在频率不太高的情况下该误差对测试结果的影响很小。

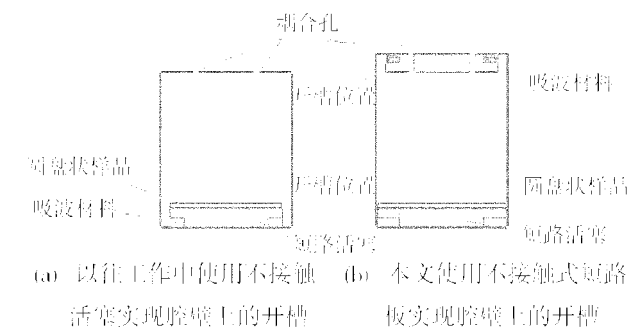


图2 本文使用的谐振腔和以往使用的谐振腔的对比  
Fig.2 Comparison of cavity used in this paper and cavity used before

但随着测试频率的增高(毫米波段), 样品和腔壁间的缝隙的电长度会增大, 这时小缝隙对测试结果产生的影响不可忽略, 因此把开槽的位置移至短路板

和腔壁结合处[图 2(b)],减小样品与腔壁间缝隙,从而减小了样品与腔壁间缝隙引入的测试误差。

### 3 测试系统

测试系统由计算机、矢量网络分析仪、耦合装置和圆柱谐振腔等组成,如图 3 所示。Agilent 82357A 是 USB - GPIB 转换接口,用以连接计算机和矢量网络分析仪。本文选用的矢量网络分析为 Agilent - N5230,该型号的矢量网络分析仪具有很好的稳定性,并可以由 VC、VB 等计算机语言编程控制实现大部分功能。本文采用 VC 编写了控制界面,实现了计算机对矢量网络分析仪的控制。

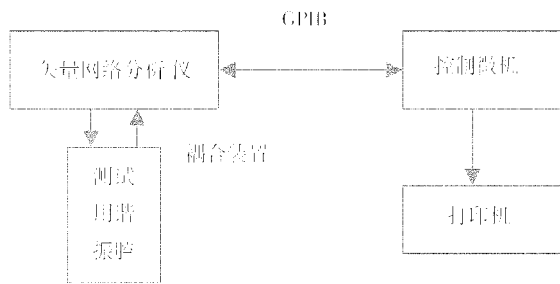


图 3 毫米波复介电常数测试系统  
Fig.3 Simple graph of millimeter wave complex permittivity measurement

### 4 结果分析

表 1 给出的是空腔不同谐振频率的无载品质因数。极易看出空腔的无载品质因数在所有的频率点均大于 16 000,这保证了复介电常数的准确测试。

表 1 空腔测试结果

Tab.1 Test results of empty cavity

频率/GHz	$Q_0$
21.139	16732
22.772	23072
24.856	24841
27.265	21590
29.893	29816
32.669	26807
35.561	28484
37.541	26499

对石英样品进行了测试,样品厚度为 1.16 mm,测试温度为 25.0℃,环境湿度为 50.0%。测试结果如表 2 所示。测试中的误差源包括:  $\Delta L$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta D$ ,  $\Delta f_{00}$ ,  $\Delta Q_{00}$ ,  $\Delta f_{0e}$ ,  $\Delta Q_{0e}$  以及腔体短路活塞安装的重复

性。经过对方程(1)~(6)采用误差递推、误差源采集和用方和根综合进行误差分析后发现  $\Delta d$  是主要的误差源。最可几测试误差:  $|\Delta \varepsilon_r / \varepsilon_r| = 2\% |\Delta \tan \delta| = 10\% \tan \delta + 5 \times 10^{-5}$ 。

表 2 石英样品的测试结果

Tab.2 Test results of quartz sample

频率/GHz	$\varepsilon'_r$	$\varepsilon''_r/10^{-3}$	$\tan \delta/10^{-4}$
21.139	3.78	0.484	1.30
22.772	3.80	0.517	1.40
24.856	3.79	4.73	1.28
27.265	3.80	1.72	4.64
29.893	3.81	1.66	4.48
32.669	3.81	1.76	4.75
35.561	3.81	1.86	5.00
37.541	3.81	1.99	5.36

### 5 结论

对低损耗介质材料复介电常数的精确测量系统,从圆柱谐振腔空载和加载的测量数据中可以看出,本文采取的干扰模抑制方式取得了很好的抑制效果,能滤除大部分干扰模,开槽位置的改变减小了测试误差。从每次测量得到的圆柱谐振腔谐振频率和品质因数数值及计算得到的复介电常数结果分析可以看出,系统具有较好的稳定性和较高的测量精度;采用 VC 编程实现对矢量网络分析仪的控制,使得整个测量过程自动化程度高,操作使用方便。最可几测试误差:  $|\Delta \varepsilon_r / \varepsilon_r| = 2\%$ ;  $|\Delta \tan \delta| = 10\% \tan \delta + 5 \times 10^{-5}$ 。

#### 参考文献

- 曹江. 介质材料电磁参数测量综述. 宇航计测技术, 1994;13(3):30~34
- 何小瓦,李恩等. 介质材料复介电常数变温测量技术综述. 宇航材料工艺,2005;35(1):20~23
- GB/T5597—1999, 固体电介质微波复介电常数测试方法
- 周清一. 微波测量技术. 北京:国防工业出版社,1964:286~320
- 郭高凤,李恩,张其劭. 低损耗介质材料复介电常数的变温测试. 航空材料学报,2003;10(增刊):194~297
- 刘长江. 宽频带低损耗介质微波复介电常数测试技术的研究. 电子科技大学硕士论文,2005:5~7
- 张克潜,顾茂章. 微波技术. 北京:电子工业出版社,1989:267~327

(编辑 李洪泉)