

重入式谐振腔法低损耗材料复介电常数测试系统

周 杨 李 恩 郭高凤 杨 涛

(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)

文 摘 利用重入式谐振腔针对微波低频段复介电常数测试问题进行了研究, 建立了测试系统并对样品进行了测试, 验证了该测试方法的可行性。相对于其他同频段的测试方法, 其具有体积小、测试精度高、样品放置方便等优点。

关键词 重入式谐振腔, 复介电常数, 微波测试

A System to Measure Complex Permittivity of Low Loss Materials by Using Reentrant Cavity

Zhou Yang Li En Guo Gaofeng Yang Tao

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

Abstract A broadband complex permittivity measurement technique of low loss dielectric materials at low microwave frequencies using the reentrant cavity is presented. The testing system is established and several materials are measured by the system. It is proved by the experiment that the presented method is valid. The method features high accuracy, small size and the sample is easy to place.

Key words Reentrant cavity, Complex permittivity, Microwave measurement

0 引言

低损耗电介质材料广泛应用于雷达、微波电路、遥控遥测等方面, 其复介电常数的准确测试至关重要。测试结果能够评价材料性能的好坏, 为系统的设计提供准确的参数, 同时也对电介质材料的生产研发具有指导意义。目前的测试方法有圆柱谐振腔法^[1-3]、波导/同轴线传输反射法^[4-5]等。对于低损耗材料, 本文研究了用重入式谐振腔进行微波低频段复介电常数测试的方法。

1 腔体设计

将两端短路的同轴线谐振腔的内导体与腔体一侧的端面脱离一段距离 d , 便构成了重入式谐振腔, 见图 1。当内导体长度 l 相对于 d 较短时也可以认为是由圆柱谐振腔中间加了一块圆形突起演变而来, 不同形状比例的重入式谐振腔其分析设计方法也不相同, 文献[6-8]对其有详细介绍。本文中, 需要测试的谐振频率较低(400 MHz 左右), 所以腔体较长, 这

种情况下腔体的内导体与该端面就形成了一个电容, 相当于一端长 l 的同轴线, 其一端已短路, 另一端则带有一个电容负载, 其等效电路图如图 2 所示。

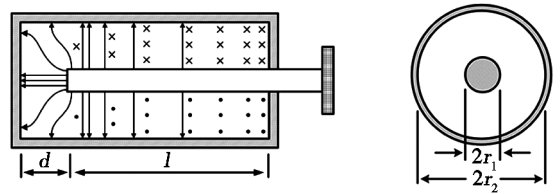


图 1 重入式谐振腔结构示意图

Fig. 1 Structure of reentrant cavity

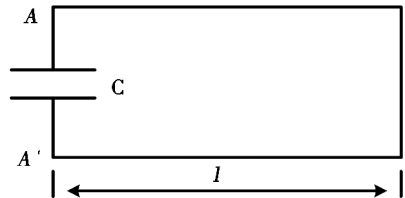


图 2 重入式谐振腔等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuits of reentrant cavity

电容加载的重入式谐振腔的谐振频率可以用计算总电纳的方法来确定,首先在参考平面 AA' 的右部分为一终端短路的同轴线,其在 AA' 端面上的输入阻抗为:

$$Z = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{Z_0 + jZ_L \tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} = Z_0 j \tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r'}} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

式中, λ 为工作波长, r_1 和 r_2 为腔体的内导体外径和外导体内径, l 为内导体长度, Z_L 为终端负载阻抗, 此处 $Z_L = 0$, ϵ_r' 为腔体填充介质的相对复介电常数的实部, 与复介电常数 ϵ 及损耗角正切 $\tan\delta$ 的关系见式(3)

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'') = \epsilon_0\epsilon_r'(1 - j\tan\delta) \quad (3)$$

加载电容 C 的值为:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0\epsilon_r'\pi r_1^2}{d} + 4\epsilon_0\epsilon_r'r_0 \ln\left(\frac{r_2 - r_1}{d}\right) \quad (4)$$

式中, C_1 是内导体底端与腔壁端面构成的平板电容, C_2 是内导体与腔壁之间的边缘电容, d 为内导体与端面的距离。当填充介质为空气时 $\epsilon_r' = 1$ 。谐振时在 AA' 端面上的总电纳应为零:

$$\sum B = \omega C - \frac{1}{Z_0} \cot\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) = 0 \quad (5)$$

通过用数值方法求解超越方程(5)就可以得到谐振腔的谐振频率,也可以根据需要的测试频率来求得腔体的尺寸。为了使腔体的品质因数最高,同轴线的特性阻抗应为 75Ω 。综合考虑谐振频率、品质因数、腔体体积等因数,最终确定 $r_1 = 4.5 \text{ mm}$, $r_2 = 15 \text{ mm}$, $l = 175 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$ 。

2 测试原理

测试时样品放在电容加载端的短路面上(图3),测试腔体通过同轴线耦合环进行能量耦合,耦合环应放在磁场最强处并让磁力线垂直穿过耦合环,所以耦合环应该安装在如图3所示靠近短路腔壁的两侧。腔体上下短路活塞必须和腔体紧密接触,否则会切断表面电流造成电磁能量损失而无法谐振,同时下活塞也要能够方便的上下移动以便填装样品,所以在下活塞周围要安装弹簧片以保证电接触良好。

测试前先进行空腔校准,把活塞顶入腔体中测量出此时的谐振频率 ω_0 和品质因数 Q_0 ,然后把待测样品放在活塞上顶入腔体,测出加载样品后的谐振频率 ω 和品质因数 Q ,代入以下公式就能够计算出待测样品的介电常数和损耗^[9]。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} &= - \frac{(\epsilon' - \epsilon_0) C_e \iint_{\Delta V} \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}_0 dV}{2\epsilon_0 \iint_V \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}_0 dV} = - \frac{(\epsilon' - \epsilon_0)}{2\epsilon_0} \eta \\ \frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} &= \frac{\epsilon'' C_e \iint_{\Delta V} \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}_0 dV}{\epsilon_0 \iint_V \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}_0 dV} = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \eta \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中, V 为腔体总体积, ΔV 为样品所占的体积空间, \mathbf{E}_0 为微扰前腔体的电场, η 为形状因子, 只与样品和腔体的形状有关, 该因子可以由微波理论进行场分析得到, 也可将已知参数的样品放入谐振腔中测得谐振频率和品质因数, 然后代入式(6)中反算出该尺寸下的 η 。

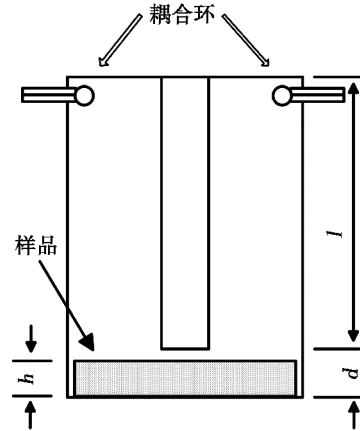


图3 测试腔体结构图

Fig. 3 Structure of cavity with sample

3 测试系统

测试系统框图见图4,其网络分析仪为 Agilent 公司的 E8363B,计算机通过 GPIB 卡控制矢量网络分析仪分别读取加载样品前后腔体的谐振频率和品质因数,然后自动计算得到样品的复介电常数。

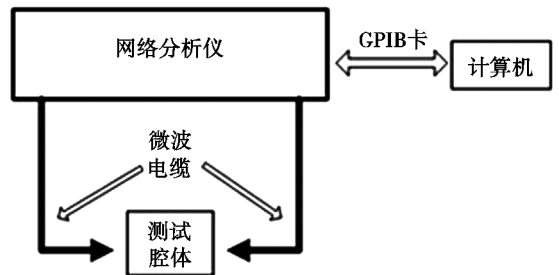


图4 测试系统框图

Fig. 4 Block diagram of test system

4 测试结果

从表1可以看出,空腔的品质因数均大于1000。为了验证该系统的准确性,测试了一些介电性能已知的样品。图5和图6是对石英和聚四氟乙烯的测试结果,可以看出,测试结果与文献[10-11]吻合较好。

表 1 空腔测试结果

Tab.1 Test results of empty cavity

模式	谐振频率/MHz	品质因数
1	402	1044
2	1207	1086
3	2012	1075
4	2820	1350
5	3631	1675
6	4445	1925
7	5265	2205

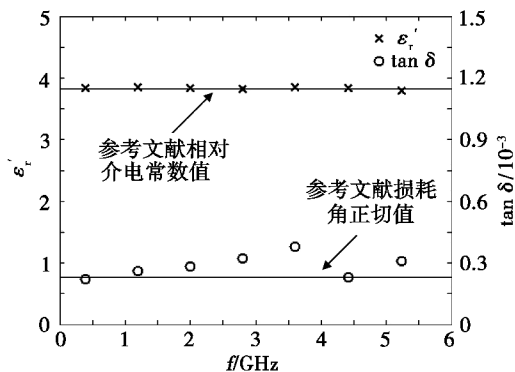


图 5 熔融石英复介电常数测试结果

Fig.5 Measured dielectric constant and loss tangent versus frequency for fused quartz

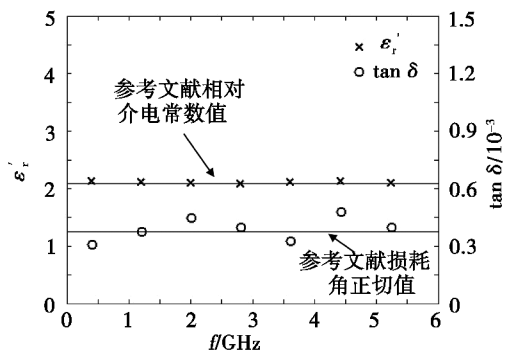


图 6 聚四氟乙烯复介电常数测试结果

Fig.6 Measured dielectric constant and loss tangent versus frequency for Teflon

5 结论

研制了一套重入式谐振腔复介电常数测试装置,能够在微波低频段对低损耗材料的复介电性能进行测试,详细分析了腔体设计方法和测试理论,并对一

些典型样品进行测试以验证该测试系统的可行性,从测试结果可以看出,该测试系统具有体积小、测试精度高、样品放置方便等优点。

参考文献

- [1] Keam R, Green A D. Measurement of complex dielectric permittivity at microwave frequencies using a cylindrical cavity [J]. Electron. Lett., 1995, 31(3): 212-214
- [2] Li D, Free C E, Pitt K E G, et al. A simple method for accurate loss tangent measurement of dielectrics using a microwave resonant cavity [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 11(3): 118-120
- [3] Li E, Nie Z, Guo G, et al. Broadband measurements of dielectric properties of low-loss materials at high temperatures using circular cavity method [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2009, 92: 103-120
- [4] Nicolson A M, Ross G F. Measurements of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1970, 19(4): 377-382
- [5] Baker-Jarvis J, Venzura E J, Kissick W A. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1990, 38(8): 1096-1103
- [6] Barroso J J, Castro P J, Neto J P L, et al. Analysis and simulation of reentrant cylindrical cavities [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 26(8): 1071-1083
- [7] Xi W, Tinga W R, Voss W A G, et al. New results for coaxial re-entrant cavity with partially dielectric filled gap [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1992, 40(4): 747-753
- [8] Susanta Sen, Saha P K. Equivalent circuit of a gap in the central conductor of a coaxial line [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1982, 30(11): 2026-2029
- [9] Eldumiati I I, Haddad G I. Cavity perturbation techniques for measurement of the microwave conductivity and dielectric constant of a bulk semiconductor material [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1972, 20(2): 126-132
- [10] Von Hippel. Dielectric Materials and Applications [M]. The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons INC. NEW YORK, 1952
- [11] Shackelford J F, Alexander W. CRC Materials and Engineering Handbook [M]. CRC Press, 2001

(编辑 吴坚)