

TM_{0n0} 圆柱腔测量介质复介电常数

徐汝军 李恩 周杨 郭高凤

(电子科技大学,成都 611731)

文 摘 讨论了 TM_{0n0} 模圆柱腔法测量介质复介电常数的原理,提出了一种 TM_{0n0} 模圆柱腔设计的改进方法,研制了测试夹具,通过与未改进腔体比较和对石英样品复介电常数的测量。结果证明,该腔体大量抑制了圆柱腔的干扰模式数量,减小了测试误差,提高了测试准确度。

关键词 微波测量,复介电常数,圆柱腔

Complex Permittivity Measurement by TM_{0n0} Circular Cavity

Xu Rujun Li En Zhou Yang Guo Gaofeng

(University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731)

Abstract The theory of complex permittivity measurement of dielectric with circular cavity is described, a new method of TM_{0n0} circular cavity design is reported, we designed the measuring system, compared with other cavity and measurement of some kinds of dielectric. We can see many disturbing modes disappear in the cavity. This system has a low measuring error and, makes the measurement more precise.

Key words Microwave measurement, Complex permittivity, Circular cavity

1 引言

低损耗材料在各种电子器件中有着广泛的用途,尤其对于微波行波管,介质夹持杆是行波管的重要组成部分,其微波性能及轴向复介电常数分布对行波管的性能有重要影响。一直以来多采用 TM_{0n0} 模圆柱腔的方法测量^[1]。1987 年我国推出了利用 TM_{0n0} 圆柱腔测试介质复介电常数的 GB/T 7265^[2]。1997-2002 年,电子科技大学采用 TM_{0n0} 模圆柱腔法实现了对行波管夹持杆快速自动测量^[3-4]。TM_{0n0} 圆柱腔的设计关键是对非工作模式的抑制,在样品测试过程中,当非工作模式与 TM_{0n0} 模式的谐振频率十分接近时,将影响 TM_{0n0} 模的准确确定,从而影响对介质复介电常数准确测量。本文分析了用 TM_{0n0} 模圆柱腔测量介质

复介电常数的原理,提出了一种针对圆柱腔的创新设计,利用在腔体表面开缝的方法,达到对干扰模式的抑制。

2 测试原理

R. A. Waldron 在 1960 年提出了基本的处理方法^[5]。一般采用如图 1 所示的谐振腔进行测试,在腔体两侧用耦合环激励,选用 TM_{0n0} 模式。在这种模式下,电场仅有 z 向分量 E_z ,磁场沿圆周分布为 H_ϕ 。所以场分布仅和径向半径 r 有关,在腔体中央插入介质棒不会改变场的对称性和独立性。根据边界条件及腔内电磁场的完备性唯一性定理可解得 TM_{0n0} 模式的特征方程^[4]:

$$\sqrt{\varepsilon_r'} J_1(\sqrt{\varepsilon_r'} \beta_0 b) [J_0(\beta_0 a) Y_0(\beta_0 b) - J_0(\beta_0 b) Y_0(\beta_0 a)] = J_0(\sqrt{\varepsilon_r'} \beta_0 b) [J_0(\beta_0 a) Y_1(\beta_0 b) - J_1(\beta_0 b) Y_0(\beta_0 a)] \quad (1)$$

式中: ε_r' 为被测介质的相对介电常数; β_0 为自由空间的传播常数; a 、 b 分别为测试样品和测试腔半径,其中 b 可由测量空腔谐振频率求得, $J_n(x)$ 、 $Y_n(x)$ 分别为 n 阶贝塞尔函数、黎曼函数。对上式进行求解即可

得到被测材料的介电常数 ε_r' 。

根据定义,由腔内加载介质后的谐振频率和品质因数,可得介质的损耗角正切计算公式为

$$\tan\delta = \frac{A}{Q} - BR_s \quad (2)$$

式中, A 、 B 为经过严格电磁场分析的常数

$$A = \left[\frac{b^2}{a^2} F(u, v) + \varepsilon'_r - 1 \right] / \left\{ \varepsilon'_r \left[\frac{J_1^2(\sqrt{\varepsilon'_r} \beta_0 b)}{J_0^2(\sqrt{\varepsilon'_r} \beta_0 b)} + 1 \right] \right\} \quad (3)$$

$$B = \frac{R_s}{\pi f_{0e} h \mu_0 \varepsilon'_r} \left[\frac{R(R+h)}{r^2} F(u, v) + \varepsilon'_r - 1 \right] / \left[\frac{J_1^2(\sqrt{\varepsilon'_r} \beta_0 b)}{J_0^2(\sqrt{\varepsilon'_r} \beta_0 b)} + 1 \right] \quad (4)$$

$$F(u, v) = \left[\frac{J_0(v) Y_1(v) - J_1(v) Y_0(v)}{J_0(u) Y_0(v) - J_0(v) Y_0(u)} \right]^2, u = \beta_0 a, v = \beta_0 b \quad (5)$$

R_s 为腔体的表面阻抗, $R_s = \sqrt{\frac{2\pi f_0 \mu_0}{2\delta}}$, δ 为腔壁的电导率, 可通过测量空腔品质因数确定。

为未处理的腔体, 右边为做开缝处理后的腔体。

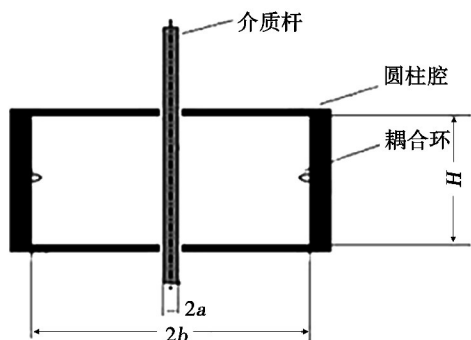


图1 TM_{0n0} 模圆柱腔结构图
Fig. 1 Mode of TM_{0n0} circular cavity

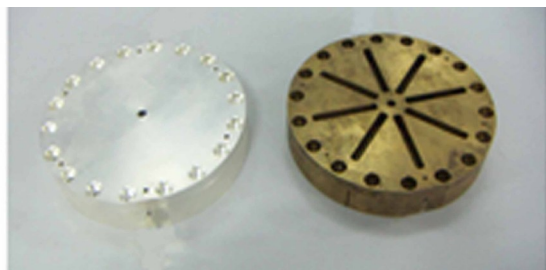
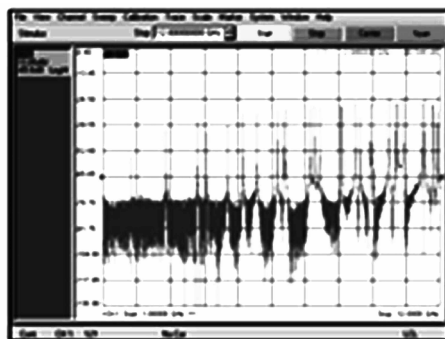


图2 改进前后的 TM_{0n0} 模圆柱腔实物
Fig. 2 Innovative TM_{0n0} circular cavity and old one

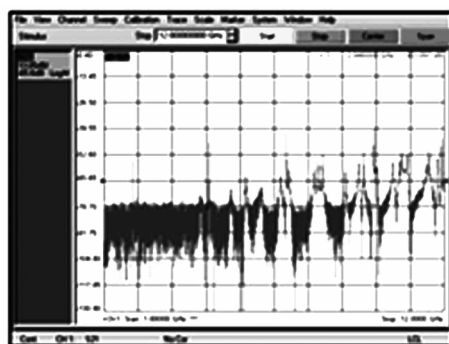
3 腔体设计

设计了两个尺寸相同的可在 1–12 GHz 测量介质的谐振腔, 适当选取测试腔的尺寸可以抑制一些非工作模式的干扰。对其中一个腔体做开缝处理, 另一个腔体不做任何处理。

腔体用黄铜加工, 表面镀银以提高腔体固有品质因数, 腔体的中心位置有一圆形通孔, 用以插入被测材料。对其中一个腔体进行开缝处理, 开缝的原则如下: 开缝沿 TM_{0n0} 模式表面电流方向, 由于该缝隙不切割 TM_{0n0} 模式的表面电流, 但切割了 TE 模和非轴对称的 TM 模表面电流, 因此该缝对 TM_{0n0} 模的谐振影响很小, 而对其他非 TM_{0n0} 模, 由于其能量被大量耦合到了腔外而被吸波材料吸收, 破坏了这些模式的谐振条件, 使它们的谐振频率发生变化, 品质因数降低, 从而削弱了这些模式对 TM_{0n0} 模的干扰, 提高测试准确度。具体操作如下: 在腔体表面沿半径方向由圆心向外开八条缝, 缝宽度为 0.5 mm, 同时在每条缝的两侧开一定宽度的槽, 使缝两侧的腔壁变薄, 槽宽 6 mm。在腔体侧面由外向内进行线切割, 在对称位置开四条缝, 缝宽为 0.5 mm。在腔体的下表面沿对称位置由外向内开四条缝, 缝宽为 0.5 mm, 且与侧面的四条缝相连。测试过程中在槽内填满吸波材料, 以吸收辐射到腔外的能量。腔体具体外形如图 2 所示, 其中左边



(a) 未处理



(b) 开缝处理

图3 两种腔体谐振曲线对比

Fig. 3 Resonance curve comparison chart of cavities

基于上述理论分析与设计, 建立了 TM_{0n0} 模圆柱腔测试夹具, 并对两种腔体的空腔进行了实测, 实测 S_{21} 曲线如图 3 所示。由对比图可以看出经处理后腔体干扰模式数量大大减少, 尤其在低频段多数干扰模式被抑制, 在高频段未被完全抑制的干扰模式, 其品质因数也大大降低, 对工作模式的影响变小, 在测试

过程中对工作模式进行判定更加容易。

为了实现不同直径杆状样品不同位置的复介电常数的测量,本文设计了相关的测试夹具。

4 结果分析

利用 VC++ 编写的自动测试软件,对开缝腔体空腔品质因数进行了测量,试数据如表 1 所示。

表 1 空腔测试结果

Tab.1 Test results of empty cavity

频率/GHz	Q_{theory}	Q_{test}
1.910	5848	5195
4.389	8859	7664
6.884	11093	6513
9.384	12949	10145
11.89	14571	11507

由表 1 可以看出腔体空腔品质因数在所有的频率点均大于 5 000,且与理论品质因数比较接近,满足 TM_{0n0} 模圆柱腔介质复介电常数测试要求。

利用开缝处理的腔体,分别对两种石英样品进行了测量,样品为圆柱状,直径 $r = 5 \text{ mm}$,高度 $h = 15 \text{ mm}$ 。测量结果如表 2 示。

表 2 石英样品的测试结果

Tab.2 Test results of quartz sample

频率/GHz	ε'_r	$\tan\delta/10^{-4}$
1.908	3.84	1.44
4.374	3.82	1.42
6.849	3.83	2.72
9.317	3.83	1.20
11.78	3.82	2.98

文献[6]给出了 MIT 对石英复介电常数的测试结果,其中在 25°C 、 8.52 GHz 时,测试结果为 $\varepsilon'_r = 3.82$ 、 $\tan\delta = 1.5 \times 10^{-4}$ 。对比可以看出本腔体的测试结果与 MIT 的比较吻合。在不同的频点相对介电常

数的波动范围小于 0.52% ,损耗角正切值均在 10^{-4} 数量级以内,说明本腔体的测试结果是可信的。

测试过程中的误差源包括:样品尺寸的测试误差 Δr ,腔体尺寸的计算误差 Δh 、 Δb ,腔体谐振频率及品质因数的测试误差 Δf_{00} 、 ΔQ_{00} 、 $\Delta f_{0\varepsilon}$ 、 $\Delta Q_{0\varepsilon}$,样品的不理想引入的误差 $\Delta\varepsilon_r$ 。对公式(1)(2)进行误差递推,用方和根综合对误差进行分析可得, $|\Delta\varepsilon'_r/\varepsilon'_r| \leq 2\%$, $|\Delta\tan\delta| \leq 10\% \tan\delta + 8 \times 10^{-5}$ 。

5 结论

对圆柱腔内不同模式的壁电流分布进行分析,提出了一种 TM_{0n0} 模圆柱腔改进方法,采用在腔体表面进行开缝的方法达到对干扰模式的抑制。通过开缝与未开缝腔体谐振曲线对比,可以看出开缝腔体有效地减少了圆柱腔的干扰模式,使测试结果更加准确可靠。通过对石英样品的测试可以看出测试结果可信,说明这种对腔体的创新设计是有效的,且易于实现。

参考文献

- [1] Shihe L, et al. Precise calculations and measurements on the complex dielectric constant of lossy materials using TM_{0n0} cavity perturbation techniques [J]. IEEE Trans, 1981, Mar-29(10): 1041-1047
- [2] 张其劭等. 固体电介质微波复介电常数的测试方法——微扰法[S]. 北京:中国标准出版社,1987:1-1
- [3] 李恩,郭高凤,张其劭. 行波管夹持杆微波参数的快速测量[J]. 仪器仪表学报,2006(6):46-47
- [4] 唐宗熙,张其劭. 行波管夹持杆自动测试系统[J]. 计量学报,1997(10):308-312
- [5] Waldron R A et al. Perturbation theory of resonant cavities [R]. Proc. IEE, vol. 1960, Sept, 107C:272-274
- [6] Westphal W B, Iglesias J. Dielectric measurements on high-temperature material [R]. Laboratory for Insulation Research, Massachusetts Institute of Technology, AD873028, 1971

(编辑 吴坚)