

前 言

本标准是对 GB/T 5597—1985《固体电介质微波复介电常数的测试方法》的修订。

本标准对原标准 GB/T 5597—1985 做了如下修订：

信号源由扫频信号源改为频综信号源，使测试系统大为简化；由于改窄带反射速调管扫频工作点，指示器用 $4\frac{1}{2}$ 位普通数字电压表代替原采用的双踪示波器；测试误差分析由原来采用各误差源的“贡献”绝对值求和改为方和根的误差综合，因而测试误差大幅下降， $\Delta\epsilon'/\epsilon'$ 由原来的 1.5% 降至 1.0%， $\Delta\tan\delta_e$ 由原来 $15\%\tan\delta_e+1.0\times10^{-4}$ 降至 $3\%\tan\delta_e+3.0\times10^{-5}$ ；并将 $\tan\delta_e$ 的测试范围下限由 2×10^{-4} 改为 1×10^{-4} 。

本标准自实施之日起同时代替 GB/T 5597—1985。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 都是提示的附录。

本标准由中华人民共和国电子工业部提出。

本标准由电子工业部标准化研究所归口。

本标准起草单位：中国电子技术标准化研究所、电子科技大学。

本标准主要起草人：张其劭、王玉功、李晓英。

固体电介质微波复介电常数的
测 试 方 法

GB/T 5597—1999

代替 GB/T 5597—1985

Test method for complex permittivity of solid
dielectric materials at microwave frequencies

1 范围

本标准规定了均匀的、各向同性的固体电介质材料微波复介电常数的测试方法。
本标准适用于频率范围为 2 GHz~18 GHz 内复介电常数的测定。推荐测试频率为 9.5 GHz。其测定范围:相对介电常数实部 ϵ' 为 2~20, 介质电损耗角正切 $\tan\delta_\epsilon$ 为 $1\times 10^{-4}\sim 5\times 10^{-3}$ 。

2 定义

复数介电常数 ϵ 为:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'') \dots\dots\dots (1)$$

式中: ϵ_r —— 复数相对介电常数;
 ϵ_0 —— 真空介电常数, 其值为 $8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$ 。

本标准所述及的复数介电常数实际上均指相对介电常数, 并以相对介电常数的实部 ϵ' 和介电损耗角正切 $\tan\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ 表征之。

3 测试原理

在一确定频率下圆柱型 TE_{01n}^0 模式高品质因数测试腔的谐振长度为 l_0 , 固有品质因数为 Q_{0e} , 如图 1 (a) 所示。当此测试腔中放入厚度为 d 的盘状试样后, 如图 1 (b) 所示, 将发生两方面的变化: (1) 由于介质试样的介电常数 ϵ 大于 1, 因此填充有试样介质的那段波导的相位常数将增大, 在原频率上产生谐振的腔体长度将缩短为 l_s ; (2) 由于介质试样将引入附加的介质损耗, 导致测试腔的固有品质因数下降为 Q_{os} 。



图 1

根据测试腔在放入介质试样前后, 其谐振长度变化量 $S(S=l_0-l_s)$ 和品质因数的改变量, 可以分别推算出介质材料的介电常数 ϵ' 及介质电损耗角正切 $\tan\delta_\epsilon$ 。

因此复介电常数的测试可归结为对高品质因数测试腔在放入介质试样前后的谐振腔长度和固有品质因数的测试。

4 测试环境条件

温度	相对湿度	大气压力
20℃~30℃	45%~75%	86 kPa~106 kPa

5 仪器和设备

5.1 测试系统

采用“反应型”系统,如图 2 所示。

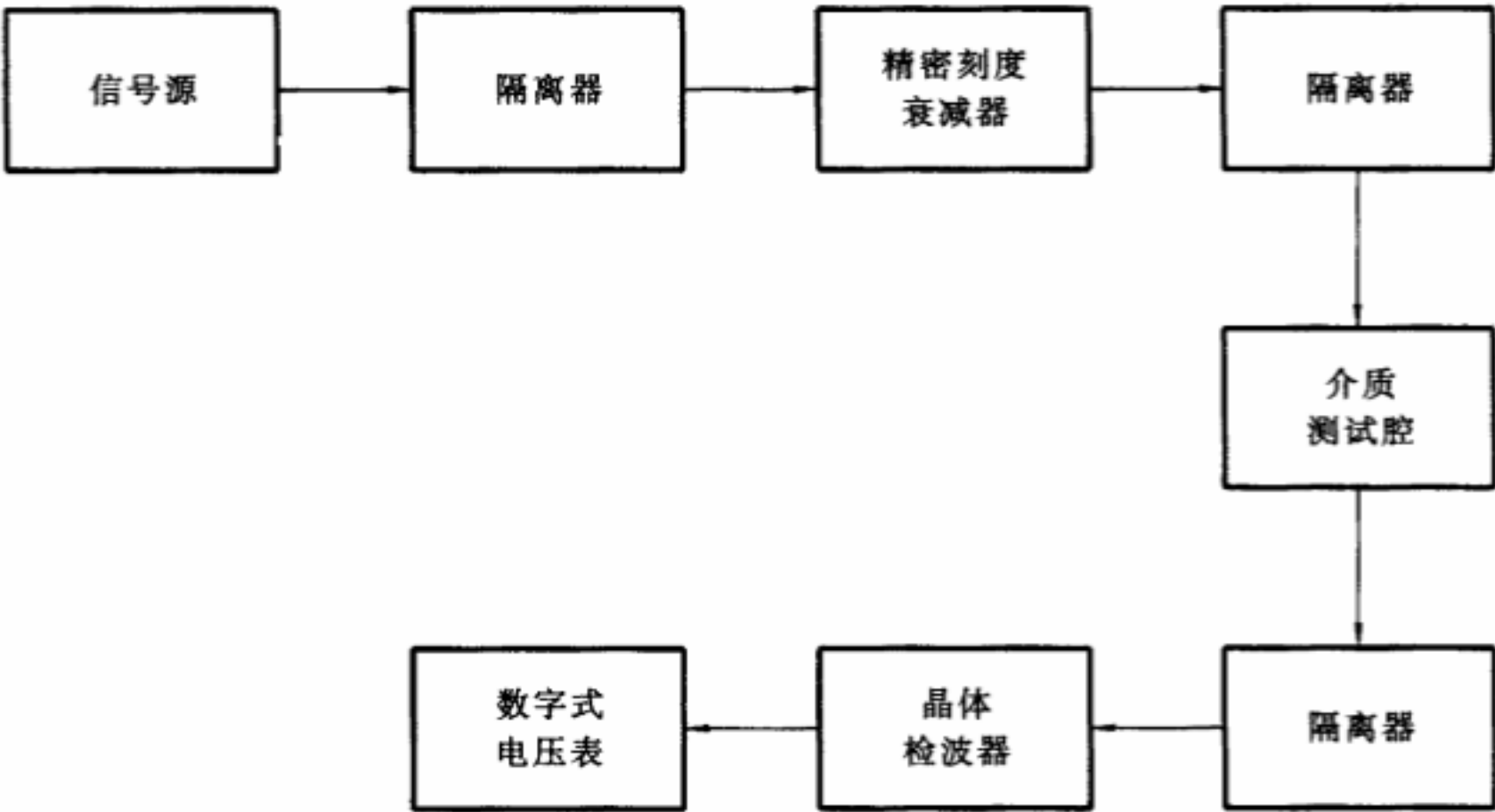


图 2

此系统的特点是用精密刻度衰减器来调节测试电平,让晶体检波器作等电平指示。进行“高频替代法”测量介质测试腔在测品质因数时的衰减量。晶体检波器作等电平指示可以完全避免晶体检波器非线性而引入的误差。

5.2 信号源

- a) 输出功率大于 10 dB;
 - b) 幅值稳定度优于 0.01 dB/10 min;
 - c) 频率稳定度优于 $1 \times 10^{-8}/10 \text{ min}$;
 - d) 频率微调分辨率优于 $1 \times 10^{-7} f_0$ 。
- 建议采用频综信号源。

5.3 精密刻度衰减器

使用范围:0~10 dB,精确度:0.02 dB/10 dB。
建议用回旋式衰减器。

5.4 介质测试腔

单模 TE_{01n}^0 工作,空腔无载品质因数 $Q_{oc} \geq 40000$,调谐活塞位置读测精度 0.01 mm。测试腔简图见附录 A(提示的附录)。

5.5 数字式电压表

电压分辨率 1 μV ,4½位读数。

5.6 晶体检波器

非调配式宽频带晶体检波器。

5.7 隔离器

隔离比优于 20 dB,正、反向驻波比系数小于 1.20。

6 试样尺寸及要求

6.1 样品直径 D_s

$$D_s = (2R - \delta) \pm 0.1 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中： R ——测试腔半径，mm；

δ ——与测试腔尺寸有关的量，在推荐测试频率的试腔中，建议定为 1.5 mm。

6.2 样品厚度 d

选择试样厚度 d 的原则是取其电长度在 85° 左右，以提高测试灵敏度并降低测试误差，在待测材料的介电常数 ϵ 大致已知的情况下，可按下式计算样品厚度。

$$d = 0.236 \left[\left(\frac{f_0}{300} \right)^2 \cdot \epsilon' - \left(\frac{1}{1.64 R} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中： f_0 ——测试频率，亦即测试腔的谐振频率，GHz；

R ——测试腔半径，mm；

d ——样品厚度，mm。

样品厚度的选择见附录 B(提示的附录)。

6.3 样品要求

盘状样品两主平面的不平行度不大于 0.01 mm，两主平面的不平直度不大于 0.01 mm。

样品表面应无不正常的斑点和划痕，内部无不正常的杂质和气孔；在测试前需严格清洁和干燥处理。

7 测试程序

7.1 空测试腔的测量

7.1.1 开机预热 15 min，使系统正常工作。

7.1.2 置信号源输出连续波频率在测试频率 f_0 上，调节精密刻度衰减器在 9.0 dB~9.8 dB 范围内，调节信号源的输出电平，使晶体检波器输出在数字式电压表上读得 10 mV 左右的指示数 a_0 ，记录此时精密刻度衰减器的衰减量 A_1 。

7.1.3 调节介质测试腔，由数字式电压表指示跌到最低点来确定测试腔已调到谐振点，谐振点频率为 f_0 ，记录介质测试腔的活塞位置刻度 l_0 和谐振频率 f_0 ，此时数字式电压表上的读数为 a_r 。

7.1.4 调节精密刻度衰减器(减少衰减量)，使数字式电压表上的读数自 a_r 上升恢复到 a_0 ，记录此时精密刻度衰减器的衰减量 A_2 ，则介质测试腔在谐振点引入的衰减为 $A_{0e} = A_1 - A_2$ ，以分贝计。

$$A_{he} = 10 \lg \left(1 + 10^{\frac{A_{0e}}{10}} \right) - 3.01 \quad \dots\dots\dots (4)$$

7.1.5 按(4)式计算谐振曲线“半功率点”衰减量 A_{he} ，置精密刻度衰减器于 $A_{he} + A_2$ 。此时数字式电压表上的读数为 a'_r ， $a'_r < a_0$ 。

7.1.6 微调信号源的频率，在谐振频率 f_0 两边，分别调到数字式电压表读数恢复为 a_0 ，记录这两个频率 f_1 及 f_2 。计算 $\Delta f_e = f_2 - f_1$ 。

7.2 置入试样后测试腔的测量

7.2.1 使用与 7.1 完全相同的步骤可测得在原确定频率 f_0 下的活塞位置刻度 l_s 、谐振点衰减量 A_{0s} 、半功率点衰减量 A_{hs} 及“半功率点”频差 Δf_s 。

7.2.2 为提高测试精度，将介质盘状试样反面再置入测试腔，重复步骤 7.1，以试样正反两次放置所得数据的平均值作为最后结果。

7.2.3 测试原始记录表格见附录 C(提示的附录)。

8 结果计算

介电常数的实部 ϵ' 、介质电损耗角正切 $\tan\delta_e$ 按式(5)和式(9)计算。

$$\epsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi}\right)^2 \left[\left(\frac{3.832}{R}\right)^2 + \beta_e^2\right] \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中： λ_0 ——自由空间波长，mm；

R ——测试腔半径，mm；

β_e ——以介电常数实部为 ϵ' 的介质所填充的圆波导中 TE_{01}^0 波的传输相位常数。

其中， λ_0 、 β_e 又分别由式(6)、式(7)决定。

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\tan\beta_e d}{\beta_e d} = \frac{\tan\beta_0(d+S)}{\beta_0 d} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中： c ——自由空间光速， 2.997×10^{11} mm/s；

f_0 ——测试腔谐振频率，Hz；

d ——介质试样的厚度，mm；

S ——装试样前后两次测试腔谐振时活塞位置的差距， $S=l_0-l_s$ ，mm；

β_0 ——真空(以空气填充)的圆波导 TE_{01}^0 波的传输相位常数。

β_0 由下式确定：

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{1.64R}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\tan\delta_e = \left[1 + \frac{1}{\epsilon' P} \left(\frac{L}{L_e}\right)\right] \left(\frac{1}{Q_{os}} - \frac{1}{Q'_{os}}\right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$P = \left[\frac{\sin\beta_0(d+S)}{\sin\beta_e d}\right]^2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$L = 2[l_0 - (d+S)] + \frac{\sin 2\beta_0(d+S)}{\beta_0} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$L_e = 2d - \frac{\sin 2\beta_e d}{\beta_e} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中： l_0 ——未装试样时测试腔谐振长度，它与腔体尺寸的关系：

$$l_0 = \frac{n}{2} \lambda_g = \frac{n}{2} \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{1.64R}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(13)$$

n —— TE_{01n}^0 测试腔谐振模式号数；

Q_{os} ——装有试样时测试腔的无载品质因数；

Q'_{os} ——装有无耗试样(假想的)时测试腔的无载品质因数。它是由未装试样的空测试腔的无载品质因数 Q_{oe} 转化而来两者的关系为：

$$Q_{oe}/Q'_{os} = q \quad \dots\dots\dots(14)$$

q 为一个转化因子，它与尺寸的关系为：

$$q = \left(\frac{k_c^2 + \beta_0^2}{k_c^2 + \beta_e^2}\right) \left[\frac{k_c^2(PL_e + L) + 2R(P\beta_e^2 + \beta_0^2)}{\left(k_c^2 + \frac{2R}{l_0}\beta_0^2\right)\left(PL_e + \frac{1}{\epsilon'}L\right)}\right] \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中： k_c ——圆波导中 H_{01}^0 波的截止波数，它与尺寸的关系为：

$$k_c = \frac{3.832}{R} \quad \dots\dots\dots(16)$$

Q_{oe} 和 Q_{os} 分别由它们的有载品质因数 Q_{Le} 和 Q_{Ls} 计算得来,关系为:

$$Q_{oe} = Q_{Le} \cdot 10^{\frac{A_{oe}}{20}} \dots\dots\dots(17)$$

$$Q_{os} = Q_{Ls} \cdot 10^{\frac{A_{os}}{20}} \dots\dots\dots(18)$$

式中: Q_{Le} ——未装试样的空测试腔的有载品质因数;
 Q_{Ls} ——装有介质试样后,测试腔的有载品质因数;
 A_{oe} ——“反应型”电路中,未装试样的空测试腔谐振时,谐振点功率跌落所对应的衰减量,dB;
 A_{os} ——“反应型”电路中,装有介质试样的测试腔谐振时,谐振点功率跌落所对应的衰减量,dB。

腔体的有载品质因数 Q_L 由“半功率”点的频宽 Δf 和谐振频率 f_0 决定,分别有:

$$Q_{Le} = f_0/\Delta f_e \dots\dots\dots(19)$$

$$Q_{Ls} = f_0/\Delta f_s \dots\dots\dots(20)$$

9 测试误差

$$\frac{\Delta \epsilon'}{\epsilon'} \leq 1.0\% \dots\dots\dots(21)$$

$$\Delta \tan \delta_e = 3\% \tan \delta_e + 3.0 \times 10^{-5} \dots\dots\dots(22)$$

测试误差综合详见附录 B(提示的附录)。

附录 A
(提示的附录)
介质测试腔结构简图

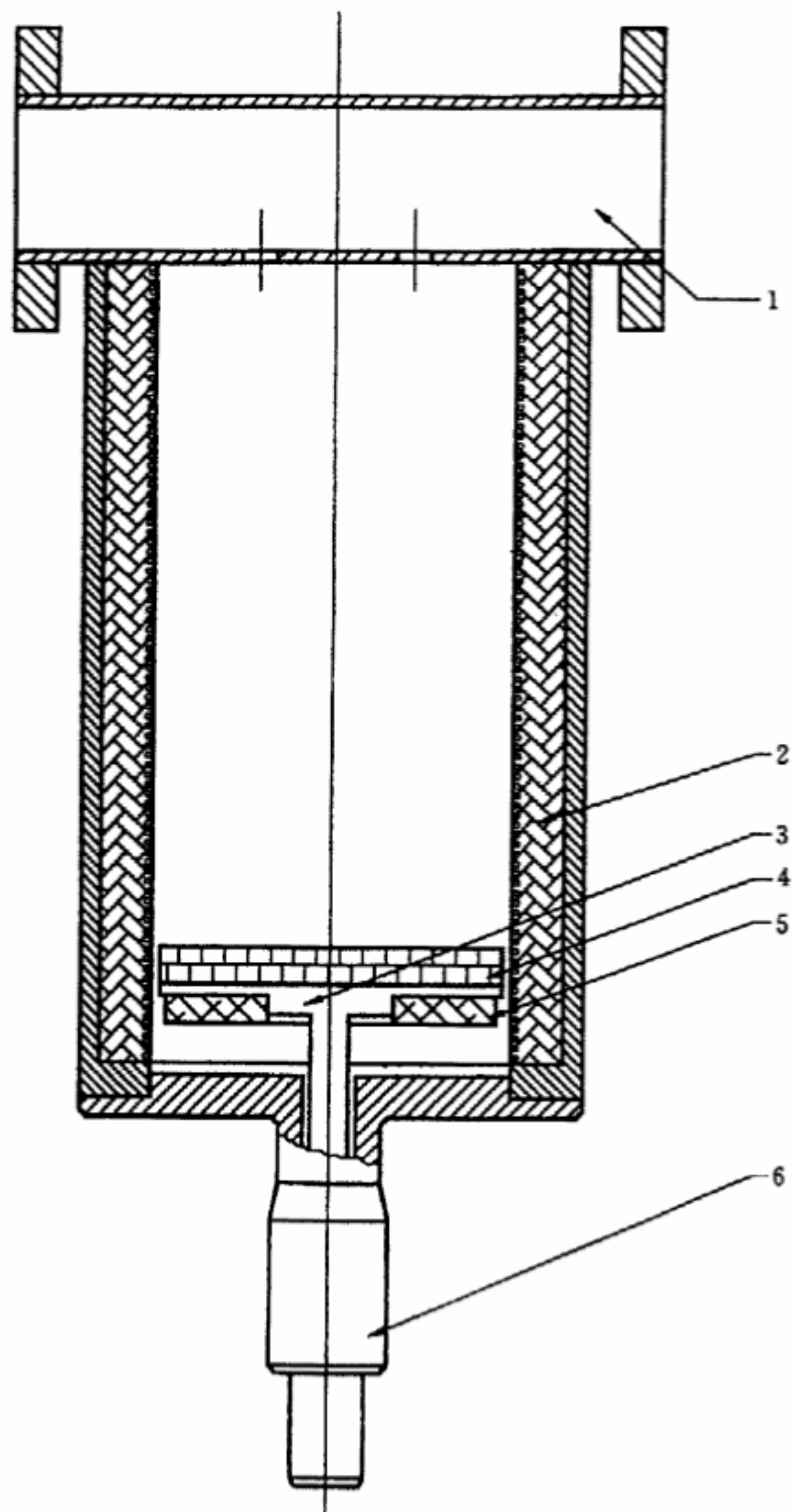
建议腔体直径 $2R=51.4\text{ mm}$;

腔体空腔长度 $L=96\text{ mm}$;

工作模式: TE_{014}^0 。

腔体可用螺旋腔构成,亦可用金属腔构成。

腔体结构简图见图 A1。



1—耦合波导;2—螺旋波导;3—调谐活塞;4—介质试样;5—吸波圆环;6—调谐测试头

图 A1 介质测试腔结构简图

附录 B
(提示的附录)
测试误差及样品厚度选择

B1 计算过程说明

对于给定的测试腔,模式号数 n 和腔体半径 R 为已知。测得样品厚度 d ,测试腔谐振频率 f_0 ,活塞位移量 S 后就可联解方程(5)、(6)、(7)、(8)而得介电常数 ϵ' 。然而,方程(7)是一超越方程,解之较费时间,因此,需要做一些具体的处理。

如果样品厚度 d 已知,由方程(5)和(7)可知:
$$S = f(\epsilon') \dots\dots\dots (B1)$$

由 ϵ' 求 S 这样的反问题,方程(7)变为一个简单的三角方程。
对于待测的样品,往往只能知道 ϵ' 的大致范围,也就不能根据方程(3)来精确设计样品厚度 d 。基于此原因,同时为了计算简捷起见,可以将介电常数 ϵ' 的测量范围分为若干小段,每一小段取 ϵ' 的中间值由方程(3)来计算样品厚度 d 。对于确定的测试腔(R, f_0 确定)可以得 d 的具体值。例如,对于某一 TE_{014}^0 测试腔有:

$$2R = 51.4 \text{ mm}, f_0 = 9.5 \text{ GHz}$$

可得:

ϵ'		2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~5.0	5.0~6.0
d	mm	5.80	5.10	4.60	4.20	3.80	3.38
ϵ'		6.0~7.5	7.5~9.0	9.0~11.0	11.0~13.5	13.5~17.0	17.0~22.0
d	mm	3.00	2.70	2.44	2.26	1.96	1.73

进而可以按方程(B1)的形式,事先计算出:
$$\epsilon' = f(S) \dots\dots\dots (B2)$$

的数据表,以备测试计算时查用。

同样,由方程(10)、(11)、(12)、(13),可以计算:
$$P = f(S)$$
$$L = f(S)$$
$$L_e = f(S)$$

由此,根据方程(15),可预先计算:
$$q = f(S) \dots\dots\dots (B3)$$

令:
$$\left[1 + \frac{1}{\epsilon' P} \left(\frac{L}{L_e}\right)\right] = N \dots\dots\dots (B4)$$

则方程(9)可写成:
$$\tan \delta_e = N \left(\frac{1}{Q_{os}} - \frac{1}{Q'_{os}}\right) \dots\dots\dots (B5)$$

显然根据方程(B2)和(B4),可以预先计算:

$$N = f(S) \quad \dots\dots\dots (B6)$$

对于确定的测试腔,是这样预先计算的:

$$\epsilon', q, N = f(S)$$

其数据表将极大地简化计算的过程。

B2 测试误差

采用方和根值进行误差综合。

$$\frac{\Delta\epsilon'}{\epsilon'} = F\{\Delta f_0, \Delta R, \Delta d, \Delta S_1, \Delta f'_0\} \quad \dots\dots\dots (B7)$$

$$\Delta \tan \delta_e = F\{\Delta f_0, \Delta R, \Delta S_1, \Delta d, \Delta(\Delta f)_s, \Delta(\Delta f)_e, \Delta A_{11}, \Delta A_{21s}, \Delta A_{21e}, \tan \delta_e\} \quad \dots\dots\dots (B8)$$

式中: Δf_0 ——谐振频率测试误差;

ΔR ——测试腔半径的加工精度;

ΔS_1 ——测量 S 时因腔体的测微头精度而引入的误差;

$\Delta f'_0$ ——放入介质前后两次测试时,测试腔调谐的偏差。它由实验统计测定;

Δd ——介质试样厚度的测量误差;

$\Delta(\Delta f)_s$ ——试样装入测试腔后,测量测试腔的“半功率”点频宽的误差。由实验统计确定;

$\Delta(\Delta f)_e$ ——测量未装试样的测试腔的“半功率”点频宽的误差,由实验统计确定;

ΔA_{11} ——测量衰减量 A_1 因衰减器精度而引入的误差;

ΔA_{21s} ——测试腔中装入试样后,测量衰减量 A_2 因衰减器精度而引入的误差;

ΔA_{21e} ——测试腔中未装试样时,测量衰减量 A_2 因衰减器精度而引入的误差;

为了达到:

$$\frac{\Delta\epsilon'}{\epsilon'} \leq 1.0\%$$

$$\Delta \tan \delta_e = 3\% \tan \delta_e + 3 \times 10^{-5}$$

的精确度,要求测试中:

$$\Delta f_0 = \Delta f'_0 \leq 1 \times 10^{-6} f_0$$

$$\Delta D = 2\Delta R \leq 0.02\% D$$

$$\Delta S_1 \leq 0.01 \text{ mm}$$

$$\Delta d \leq 0.01 \text{ mm}$$

$$\Delta(\Delta f)_s = \Delta(\Delta f)_e \leq 5 \times 10^{-7} f_0$$

$$\Delta A_{11} = \Delta A_{21s} = \Delta A_{21e} \leq 0.02 \text{ dB}$$

$$Q_{oe} \geq 40000$$

$$9 \text{ dB} > A_{oe} > 7 \text{ dB}$$

附录 C
(提示的附录)
附表

表 C1 测试原始记录表

[illegible]

表 C2 测试计算表

[illegible]