

中华人民共和国国家标准

毫米波频段固体电介质材料介电特性测试方法 准光腔法

GB 9534—88

Test method for complex permittivity
of solid dielectric materials at millimeter wave
frequencies using "Quasi-optic Cavity" technique

本标准采用光学腔,即半共焦准光腔作为测试腔体来测试固体电介质的介电特性。

本标准适用于可加工成片状的固体电介质材料。

本标准适用的测量范围:

$$f = 30 \sim 150 \text{ GHz}$$

$$\epsilon' = 2 \sim 15$$

$$\tan \delta = 5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$$

1 测量原理

准光腔存在多种模式,选定 TEM_{00q} ($00q$ 为 TEM_{00q} 工作模式的模数)为工作模式,当腔长 D_q 满足下列条件时腔体谐振。

$$D_q = \left[(q + 1) + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{D_q}{R_0 - D_q} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \frac{c}{2f} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中: f —— 谐振频率, Hz;

c —— 光速, mm/s;

R_0 —— 凹球面镜曲率半径, mm。

准光腔稳定工作条件为:

$$0 \leq \left(1 - \frac{D_q}{R_1} \right) \left(1 - \frac{D_q}{R_0} \right) \leq 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: R_1 、 R_0 为准光腔镜面曲率半径。

用一曲率半径为 R_0 、半径为 a_1 的金属凹球镜面和半径为 a_2 的金属平面镜置于一机械传动装置上,并保持两镜面的曲率中心联线与两镜面的口径中心点连线重合,构成半共焦准光腔。

耦合孔开在凹球面镜上,试样置于平面镜上。两镜之间的腔长距离 D_q 可调,如图1。

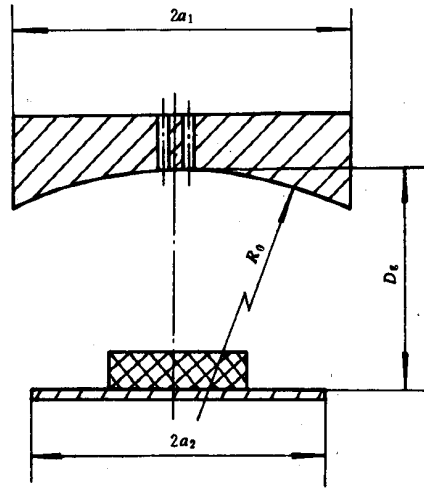


图 1

在确定的测试频率下,置入试样后,谐振腔的谐振长度和有载品质因数均发生变化。根据谐振频率、试样厚度、置入试样前后腔的谐振长度和有载品质因数值(有载 Q 值),可以计算出试样的相对介电常数 ϵ' 和损耗角正切值 $\tan\delta$ 。

2 试验仪器、设备

2.1 半共焦准光腔

2.1.1 技术要求

半共焦准光腔稳定工作条件

$$\frac{D_q}{R_0} \approx 0.5$$

半共焦准光腔的光学菲涅尔数(F)

$$F > 4$$

$$F = \frac{a_1 \cdot a_2}{\lambda_0 \cdot D_q} \dots\dots\dots (3)$$

式中: a_1 ——凹球面镜半径,mm;

a_2 ——平面镜半径,mm;

λ_0 ——谐振波长,mm。

2.1.2 凹球面镜和平面镜

根据半共焦准光腔稳定工作条件的一般要求,凹球面镜曲率半径为:

$$R_0 \approx 2D_q \dots\dots\dots (4)$$

输入耦合孔开于凹球面镜中心,输出耦合孔位于输入耦合孔近侧,孔壁厚度小于0.5 mm。

凹球面镜加工要求:

$$R_0 \pm 10 \mu\text{m}$$

平面镜平面度:0.005;

球面镜和平面镜粗糙度:0.050;

根据光学菲涅尔数范围确定球面镜的半径 a_1 和平面镜半径 a_2 , a_2 的取值还应大于5倍的束腰半径。

束腰半径 w_0^2 的计算公式见7.2条。

半共焦准光腔的无载品质因数(无载 Q 值)不小于80 000。

2.1.3 机械传动装置

机械传动装置必须保证凹球面镜和平面镜的曲率中心连线与球面镜口径中心点和平面镜直径中心点的连线重合。

凹球面镜和平面镜与重合连线的失调角必须小于 0.5° 。

调节平面镜位置可改变腔体长度 D_s, D_r 的读数分辨率 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ 。

2.1.4 半共焦准光腔的结构推荐示意图见附录C所示。

2.2 毫米波稳频稳幅信号源

输出功率应足以激励准光腔谐振并能使指示器有效指示；

输出幅值稳定度优于 $0.03 \text{ dB}/30 \text{ min}$ ；

频率稳定度优于 $5 \times 10^{-7}/\text{h}$ 。

2.3 精密标准衰减器

使用范围： $0 \sim 10 \text{ dB}$ ；

精确度： $\pm 0.05 \text{ dB}/10 \text{ dB}$ ；

端口驻波比：优于1.06。

2.4 数字式微波频率计

晶振频率稳定度：优于 $3 \times 10^{-9}/\text{d}$ 。

2.5 隔离器

隔离度：大于 20 dB ；

正向插入损耗特性：小于 3 dB ；

正、反向驻波比：小于1.15。

2.6 检波器

灵敏度和信号源电平相适应。

2.7 指示器

指示器可选用选频放大器；数字电压表。采用选频放大器作指示器时应配用调制器进行方波调制。

a. 选频放大器：工作频率 $1\ 000 \pm 8 \text{ Hz}$ ，非线性误差小于满刻度值的2%。

b. 数字电压表：5位半。

2.8 试样厚度量具

读数分辨率： 0.001 mm 。

3 测试系统

测试系统方框图见图2。

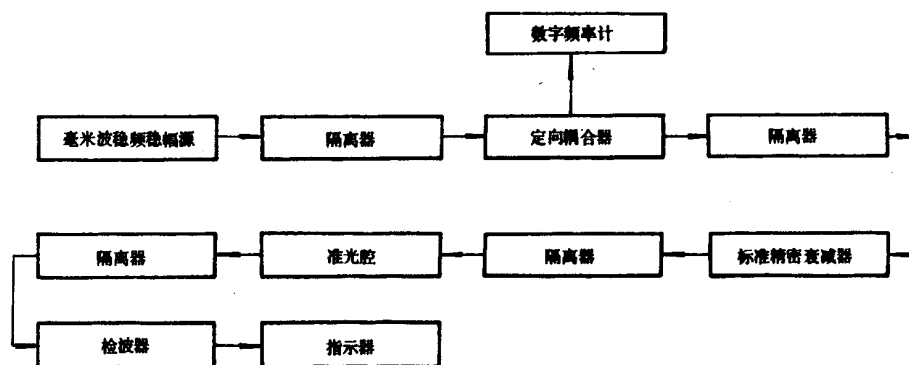


图 2

4 介质试样

4.1 试样半径大于3倍束腰半径,小于平面镜半径 a_2 。

4.2 试样厚度(t)

$$t = \frac{M\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon}} (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中: M —— 大于或等于2的整数。

4.3 试样

晶体试样晶轴定向小于 0.5° 。

5 测试条件

5.1 正常测试大气条件

温度: $20\sim 30^\circ\text{C}$;

相对湿度: $45\%\sim 75\%$;

气压: $86\sim 106\text{kPa}$ 。

对一个试样在正常测试大气条件下进行测量期间,温度、湿度应该保持稳定状态。

5.2 仲裁测试的标准大气条件

温度: $24\sim 26^\circ\text{C}$;

相对湿度: $48\%\sim 52\%$;

气压: $86\sim 106\text{kPa}$ 。

6 测试步骤

6.1 测定样品厚度 t ,精确到 0.002 mm 。

6.2 开启测试系统,预热,使系统进入稳定工作状态。精密标准衰减器置于起始衰减位置。

6.3 数字式微波频率计测定准光腔工作频率。

6.4 根据工作频率,选取半共焦准光腔 TEM_{00q} 工作模式的模数 q ,计算空腔谐振时的腔体长度 D_q 。

6.5 依据计算的腔长 D_q ,调节机械传动装置使空腔谐振,并使指示器指示读数最大。记录空腔谐振时的腔长读数 D_{q0} 和指示器指示的读数值。

6.6 调节精密衰减器使衰减量增加 3dB ,从指示器上读取谐振半功率点的指示值。

6.7 调节精密衰减器,将衰减器回复到起始分贝位置,指示器回复到原来的谐振指示读数值。

6.8 根据6.6条中读取的半功率点指示值,调节机械传动装置,改变腔体长度,测定对应谐振半功率点频率宽度的腔长变化量 ΔD_0 。

6.9 将测试样品置于平面镜中央,腔体长度置于 D_{q0} 位置,调节机械装置,缩短腔体使其恢复谐振。读取指示器读数最大时的腔长 D_{qd} 读数和指示器指示值。

6.10 依照测试步骤6.6~6.8条测定置有试样时谐振半功率点频率宽度所对应的腔体长度变化量 ΔD_d 。

6.11 翻转样品,根据测试步骤6.3至6.10条对测试样品再进行测试。

6.12 将重复测试二至三次数据的算术平均值作为最终测试结果。

6.13 测试原始记录表格见附录 B。

7 计算公式

7.1 空腔谐振时腔长 D_q 由公式(1)计算。

7.2 相对介电常数计算公式:

$$\frac{1}{n} \tan(nkt - \phi_i) = -\tan(kd - \phi_d) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\epsilon' = (1 + e)n^2$$

式中: $\phi_i = \arctan(2t/nkw_0^2)$;

$$\phi_d = \arctan\left[\frac{2}{kw_0^2}(d + t/n^2)\right] - \arctan(2t/n^2kw_0^2);$$

$$w_0^2 = \frac{2}{k}[(d + t/n^2)(R_0 - d - t/n^2)]^{\frac{1}{2}};$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0};$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f};$$

$$d = D_q - t - P;$$

$$P = D_{q0} - D_{qd};$$

e ——耦合孔、凹面镜与高斯波束等相位面不吻合以及反射镜有限电导率等影响对介电常数 ϵ' 的修正因子, e 等于 -0.0066 ;

w_0 ——束腰半径, mm;

c ——光速, $c = 2.997\,929 \times 10^{11}$ mm/s;

f ——谐振频率, Hz;

λ_0 ——谐振波长, mm;

D_q ——理论计算的空腔谐振长度, mm;

D_{q0} ——测量的空腔谐振长度, mm;

D_{qd} ——测量的置有试样时谐振腔体长度, mm。

求解超越方程(6)采用计算机数值解法。

7.3 损耗角正切值计算公式:

$$\tan\delta = \frac{1}{Q_s} \frac{G \cdot t + d}{G \cdot t + \frac{1}{2k}[\sin 2(kd + \phi_d)]} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中: $G = \frac{n^2}{n^2 \cos^2(nkt - \phi_i) + \sin^2(nkt - \phi_i)}$

$$\frac{1}{Q_s} = \frac{1}{Q_{Ld}} - \frac{1}{Q_{L0}} - \frac{D_q(G + 1)}{2(G - t + d)}$$

Q_{L0} ——空腔的有载品质因数,

$$Q_{L0} = \frac{1}{\left[1 - \frac{c}{4\pi f} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_0 - D_{q0}) \cdot D_{q0}}}\right]} \cdot \frac{D_{q0}}{\Delta D_{q0}};$$

Q_{Ld} ——置有测试样品时腔体有载品质因数,

$$Q_{Ld} = \frac{1}{\left[1 - \frac{c}{4\pi f} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_0 - D_{qd}) \cdot D_{qd}}}\right]} \cdot \frac{D_{qd}}{\Delta D_{qd}}.$$

8 误差

本标准测试方法在测试范围内的测量总不确定度:

$$\frac{\Delta\epsilon'}{\epsilon'} \leq \pm 1\%$$

$$\frac{\Delta \tan\delta}{\tan\delta} \leq \pm 11\% + 6.5 \times 10^{-6}$$

附录 A

误差分析

(参考件)

A1 介电常数 ϵ' 的测量误差

A1.1 准光腔频率误差对测量 ϵ' 引入的误差

$$\left(\frac{\Delta\epsilon'}{\epsilon'}\right)_f = -2k \frac{[\sqrt{\epsilon'}t - \phi'_i(k)]\sec^2 Q_1 + \sqrt{\epsilon'}[d - \phi'_d(k)]\sec^2 Q_2}{[Q_1 - \sqrt{\epsilon'}\phi'_i(n) + \phi_i]\sec^2 Q_1 - \phi'_i(n)\sec^2 Q_2 - \tan Q_1} \cdot \frac{df}{f} \dots\dots (A1)$$

式中:

$$\phi'_i(k) = \frac{2tnw_0^2}{n^2k^2w_0^4 + 4t^2}$$

$$\phi'_i(n) = \frac{-2t[kw_0^2 + 4t(2d + 2t/n^2 - R_0)/n^2kw_0^2]}{n^2k^2w_0^4 + 4t^2}$$

$$\phi'_d(n) = \frac{4tn[\frac{2t}{k^2n^2w_0^4}(2d + 2t/n^2 - R_0) + 1]}{k^2n^2w_0^4 + 4t^2} - \frac{4tn[\frac{2}{kw_0^2}(2d + 2t/n^2 - R_0)(d + t/n^2) + kw_0^2]}{k^2n^2w_0^4 + 4d^2n^4 - 8tdn^2 + 4t^2}$$

$$Q_1 = nkt - \phi_i$$

$$Q_2 = kd - \phi_d$$

$\phi_i, \phi_d, kw_0^2, d$ 的表达式见正文。

计算表明,耦合孔、凹面镜与高斯波束等相位面不吻合以及反射镜有限电导率对频率的影响均为负值,即:

$$\left(\frac{\Delta\epsilon'}{\epsilon'}\right)_{f_{\max}} = \begin{cases} -0.95\% & \epsilon' = 15 \\ -0.38\% & \epsilon' = 2 \end{cases}$$

根据误差处理方法,提取-0.006 6为修正因子。

$$\left(\frac{\Delta\epsilon'}{\epsilon'}\right)_{f_{\max}} = \begin{cases} -0.29\% & \epsilon' = 15 \\ +0.28\% & \epsilon' = 2 \end{cases}$$

A1.2 样品平面度对测量 ϵ' 引入的误差

$$\left(\frac{\Delta\epsilon'}{\epsilon'}\right)_t = -2 \frac{(\sqrt{\epsilon'}t - \phi_i)\sec^2 Q_1 + \sqrt{\epsilon'}\phi'_d(t)\sec^2 Q_2}{[Q_1 - \sqrt{\epsilon'}\phi'_i(t) + \phi_i]\sec^2 Q_1 - \phi'_d(n)\sec^2 Q_2 - \tan Q_1} \cdot dt \dots\dots\dots (A2)$$

式中:

$$\phi'_i(t) = \frac{2n[kw_0^2 - \frac{2t}{kn^2w_0^2}(R_0 - 2d - 2t/n^2)]}{n^2k^2w_0^4 + 4t^2}$$

$$\phi'_i(t) = \frac{\frac{2}{kw_0^2 n^2} [1 - 2(R_0 - 2d - 2t/n^2)(d + t/n^2)]}{1 + [\frac{2}{kw_0^2} (d + t/n^2)]^2} - \frac{\frac{2}{kw_0^2 n^2} [1 - 2t(R_0 - 2d - 2t/n^2)]}{[1 + \frac{2t}{n^2 w_0^2 k}]^2}$$

该项误差随待测样品 ϵ' 的增大而增加。

A1.3 空腔谐振腔长和置有试样谐振腔长之间的变化量 P 的测量误差对 ϵ' 的测试影响经计算可忽略。

A1.4 ϵ' 的测试误差合成

$$\left(\frac{\Delta \epsilon'}{\epsilon'}\right)_{\max} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta \epsilon'}{\epsilon'}\right)_{f_{\max}}^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon'}{\epsilon'}\right)_{t_{\max}}^2} \dots\dots\dots (A3)$$

A2 $\tan \delta$ 测量误差

A2.1 ϵ' 对 $\tan \delta$ 测试引入的误差

$$\Delta \tan \delta(n) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{Q_s} \cdot \frac{t \cdot G'(n)}{t \cdot G + \frac{1}{2k} [\sin 2(kd - \phi_d)]} \\ - \frac{G \cdot t + d}{Q_s} \cdot \frac{\frac{\phi'_d(n)}{k} \cos 2(kd - \phi_d) + G'(n) \cdot t}{[G \cdot t + \frac{1}{2k} \sin 2(kd - \phi_d)]^2} \end{array} \right\} d\epsilon' \dots\dots\dots (A4)$$

式中:

$$G'(n) = \frac{2n}{n^2 \cos(nkt - \phi_i) + \sin^2(nkt - \phi_i)} - \frac{n^2}{[n^2 \cos(nkt - \phi_i) + \sin^2(nkt - \phi_i)]^2} \{ 2n \cos(nkt - \phi_i) - [kt - \phi'_i(n)] n^2 \sin(nkt - \phi_i) + [2 \sin(nkt - \phi_i) \cdot kt - \phi'_i(n) \cos(nkt - \phi_i)] \}$$

此项误差的大小和材料的介电常数的大小有关。

2.2 厚度 t 的误差对 $\tan \delta$ 测试引入的误差

$$d \tan \delta(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{Q_s} \cdot \frac{G + tG'(t) + 1}{G \cdot t + \frac{1}{2k} \sin(kd + \phi_d)} \\ - \frac{G \cdot t + d}{Q_s} \cdot \frac{G + tG'(t) + \frac{1}{2k} [2k - 2\phi'_d(t)] \cos 2[kd - \phi_d(t)]}{[t \cdot G + \frac{1}{2k} \sin(kd - \phi_d)]^2} \end{array} \right\} dt \dots\dots\dots (A5)$$

式中:

$$G'(t) = \frac{-n^2}{[n \cos(nkt - \phi_i) + \sin^2(nkt - \phi_i)]^2} \cdot \{ -n^2 [nk - \phi'_i(t)] \sin(nkt - \phi_i) + [nkt - \phi'_i(t)] 2 \sin(nkt - \phi_i) \cdot \cos(nkt - \phi_i) \}$$

A2.3 Q 值测量误差对 $\tan \delta$ 测试的影响

A2.3.1 半功率点确定不准引入对 Q 值的测量误差

测试系统经计量校正后,标准衰减器在 3dB 处的读数误差为 $\Delta A = 0.02\text{dB}$ 。

$$\left(\frac{\Delta Q_0}{Q_0}\right)_* = \frac{\Delta A}{1 - \Delta A}$$

A2.3.2 半功率点带宽 Δf 测量不准对 Q 值测量的误差

$$\left(\frac{\Delta Q_0}{Q_0}\right)_{\Delta f} = \frac{\Delta(\Delta f)}{\Delta f + \Delta(\Delta f)} \dots\dots\dots (A6)$$

A2.3.3 腔体在系统中失配对 Q 值测量的误差

$$\left(\frac{\Delta Q_0}{Q_0}\right)_{\text{失}} = \begin{cases} + \frac{2\beta(s-1)}{s+2\beta} \\ - \frac{2\beta(s-1)}{1+2\beta s} \end{cases} \dots\dots\dots (A7)$$

A2.3.4 对 A2.3.1~A2.3.3 条进行误差合成,得到在系统中进行 Q 值测量的总误差

$$\left(\frac{\Delta Q_i}{Q_i}\right)_{\max} \leq 2\left(\frac{\Delta Q_0}{Q_0}\right) = \pm 2\sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)_{\text{中}}^2 + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)_{\Delta f}^2 + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)_{\text{非}}^2} \dots\dots\dots (A8)$$

Q值的测量,若有条件,采用高精度的频率合成器作信号源,用改变频率方法测定Q值,可大大提高精度。

A3 对 $\tan\delta$ 测试的总误差

$$\left(\frac{\Delta \tan \delta}{\tan \delta}\right)_{\max} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta \tan \delta}{\tan \delta}\right)_e^2 + \left(\frac{\Delta \tan \delta}{\tan \delta}\right)_i^2 + \left(\frac{\Delta \tan \delta}{\tan \delta}\right)_o^2} \dots\dots\dots (A9)$$

附录 B

测试原始记录

(参考件)

温度_____℃ 湿度_____ 测试人_____ 测试日期_____ 委托单位_____

[illegible]

附录 C
半共焦准光腔推荐结构示意图
(参考件)

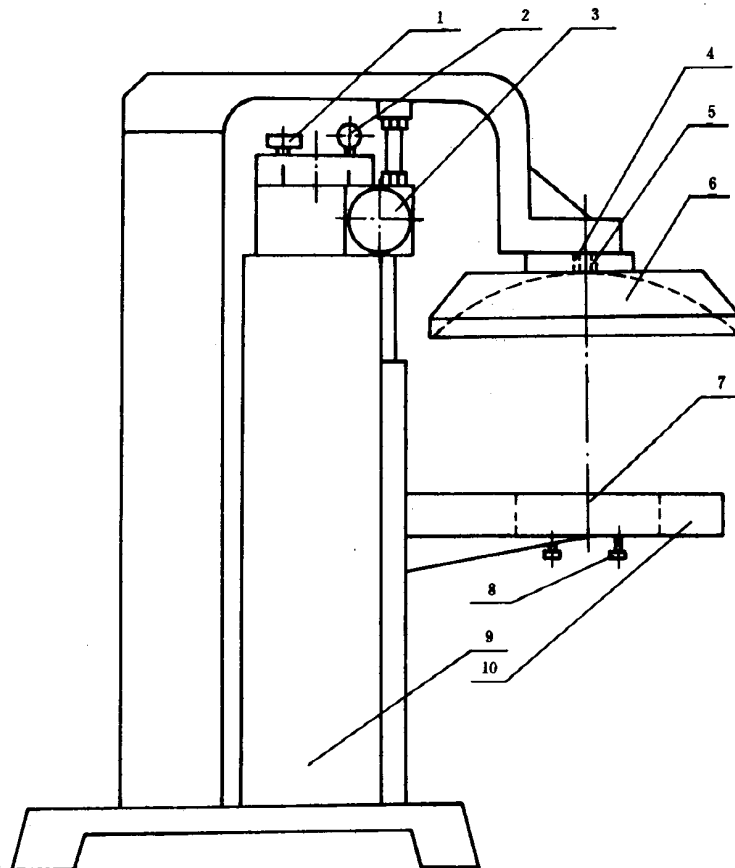


图 C1

1—粗调锁定；2—腔长粗调；3—腔长细调；4—输入耦合波导；5—输出耦合波导；6—凹球面镜；
7—平面镜；8—微调螺钉；9—支架；10—平面镜传动架

附加说明：

本标准由上海科学技术大学负责起草。