

闭式谐振腔法微波介质陶瓷介电常数测量

王 益, 张翠翠, 王建忠, 何 斌, 韩玉强

(中国工程物理研究院计量测试中心 绵阳 621900)

摘 要:采用一种封闭式的圆柱形微波谐振腔,实现了微波介质陶瓷材料以及其他中低损耗材料介电常数的准确测量,通过模式匹配技术实现了介质加载条件下腔内电磁场问题的精确求解,得到了腔体谐振频率与材料介电性能之间的精确关系,对各类典型介质材料的测量结果以及多家比对数据表明,相比于传统方法,该方法的测量准确度更高,可达到0.1%;测量范围更宽,不仅能准确测量高介电常数的微波介质陶瓷,也适用于低介电常数的交联聚苯乙烯、聚四氟乙烯等材料,此外由于闭式腔不存在辐射损耗,金属表面电流损耗也较小,对低损耗材料的 Q 值测量更加准确,损耗角测量下限达 10^{-6} 以下。该方法适用于介电常数 $\epsilon_r = 1 \sim 100$ 及以上,损耗角正切 $\tan\sigma = 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6}$ 范围内各种材料介电性能的准确测量。

关键词:微波介质陶瓷;闭式谐振腔;介电常数测量

中图分类号: TM93 TH873 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1025

Permittivity measurement of microwave dielectric ceramics using shielded-cavity method

Wang Yi, Zhang Cuicui, Wang Jianzhong, He Bin, Han Yuqiang

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: A shielded cylinder microwave resonant cavity is adopted to realize the precise measurement of permittivity of microwave dielectric ceramics and other kinds of low and medium loss materials, the mode-matching technique is employed to realize the precise solution of the electromagnetic field in the cavity under dielectric-loading condition, and the rigorous relationship between the cavity resonant frequency and material permittivity is obtained. The measurement results of various typical dielectric materials and the test data compared with those of several other methods show that compared with traditional methods, the proposed method achieves higher measurement accuracy with an estimated uncertainty as low as 0.1%; and the permittivity measurement range is extended wider. This method can not only measure the microwave dielectric ceramics with high permittivity, but also measure the low permittivity materials such as cross-linked polystyrene, teflon and etc. Furthermore, as the radiation loss is eliminated in shielded cavity, and the electric current loss in metal surface is restrained, a more accurate quality factor measurement can be realized for low loss materials; the lower limit of the loss angle tangent measurement range can be lower than 1×10^{-6} . This method is suitable for the accurate permittivity measurement of various dielectric materials with the permittivity range of $\epsilon_r = 1 \sim 100$ and above, and the loss angle tangent of $\tan\sigma = 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6}$.

Keywords: microwave dielectric ceramic; shielded resonant cavity; permittivity measurement

0 引 言

微波介质陶瓷材料作为一种新型电子功能材料,具

有介电常数高、损耗小、温度系数好等优点^[1-2],广泛应用于电子通信、航空航天、军事装备等民用和军事领域^[3-4],介电性能是评价微波介质陶瓷最主要的技术指标,包括介电常数 ϵ_r 、损耗角 $\tan\sigma$ 和温度系数 τ_f 这3项参数,准确测量介质陶瓷材料介电性能在新材料开发、应用研究、

相关器件设计等过程中发挥着不可或缺的作用。从公开发表的文献来看,目前国内对陶瓷材料制备方面的研究已取得很大进展,随着研究的深入,各类陶瓷材料种类不断丰富,性能也越来越高,介电性能测量技术也越加受到重视。

介电常数测量方法众多,大致可分为传输线法^[5-8]和谐振腔法^[9-11]两种,谐振腔法最突出的优点是准确度高,对于微波陶瓷材料目前国内普遍采用谐振腔法中的开式腔法^[12-15]进行介电性能测量。熊兆贤等人^[16]基于开式腔法研制了微波介质陶瓷介电性能自动化测量系统,通过两种方法标定得到开式腔金属板电阻率 R_s ,进而计算并消除金属表面电流损耗,提高了损耗角 $\tan\sigma$ 测量准确度,但辐射损耗未作考虑;赵飞^[17]在对微波介质陶瓷材料进行测量时,为避免金属表面欧姆损耗影响,对介电损耗值 $\tan\sigma$ 测量采用闭式腔法,但介电常数值 ε_r 测量未能采用闭腔法实现,仍然采用开式腔法进行测量;扬春燕^[18]采用了相同的处理方法;闭腔法方面,周东祥等人^[19]采用与开式腔类似的开波导法对闭式腔谐振器进行了求解,腔体底部采用了低损耗的介质基片衬垫,得到的谐振频率计算误差小于5%;曹良足等人^[20]分析了闭式谐振腔中支撑物的材质及高度、耦合结构、腔体材质等对谐振频率和 Q 值的影响,但是计算得到的 ε_r 与开式腔法测量结果相差较远;陈嘉禾等人^[21]总结了无机介质材料的介电特性测量方法,认为闭式谐振腔无法测量试样的 ε_r 值。可以看出,国内目前对微波介质陶瓷的测量方法已经有更高的需求,解决闭式谐振腔法介电常数测量关键技术具有重要应用价值。

研究中采用了一种全封闭结构的圆柱形金属腔体,替代传统开式谐振腔中由两块金属平板组成的开放式结构,以消除辐射损耗影响,并用低损耗介质柱将待测材料支撑放置于金属腔内部中心位置,降低金属感应电流损耗;采用一种基于模式匹配法结合 Rayleigh-Ritz 法的理论计算方法,解决介质加载条件下封闭金属腔内电磁场分布问题,进而得到谐振频率与材料介电性能之间的精确关系;通过矢量网络分析仪测量腔体谐振频率与谐振 Q 值,并编制计算程序求解得到材料介电常数的最终结果;最后通过比对实验验证了测量装置性能。

1 测量模型及对比分析

所采用的闭式谐振腔法介电常数测量模型如图 1 所示。圆柱封闭腔由导电率良好的金属制成,其直径和高度可根据测量频率需求确定,将被测介质材料放置于闭式谐振腔内,并用支撑柱放置于腔体的中心位置,利用两根耦合探针探测腔体内部的电磁场进行耦合,通过计算得到腔体内电磁场分布、相应电磁场模式、金属壁电流损耗

值,最后得到介质材料复介电常数的准确解。

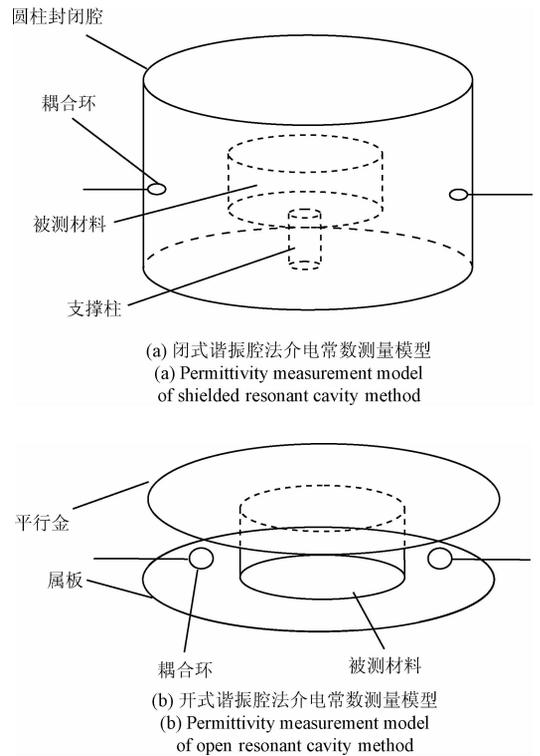


图 1 开式谐振腔与闭式谐振腔法测量模型
Fig. 1 Permittivity measurement models of shielded resonant cavity and open resonant cavity methods

闭式谐振腔与传统开式腔测量模型对比如图 1 所示,两种方法在在结构方面的区别在于,闭式谐振腔是一种全封闭结构,完全抑制了辐射损耗,只存在介质损耗和腔体内表面金属感应电流损耗,而感应电流损耗方面,由于被测材料与腔体没有直接接触,其感应电流也将大大减少,因此该结构大幅提高了材料损耗角的测量准确度和测量范围。

理论计算方法方面,由于开式腔法理论计算采用开波导法、混合磁壁法等近似算法^[12-13],假定介质空气分界面为理想磁壁,忽略了辐射损耗,对电场分布进行近似处理,使该方法具有一些固有的局限性,特别是在介质材料介电常数较低的情况下,电场分布与理论模型有较大偏差,造成介电性能测量不准确。而闭式谐振腔法能有效克服以上缺点,采用封闭腔体,边界条件明确,计算模型准确,且能有效避免电磁环境造成的干扰,测量范围更广。

2 理论计算方法

闭式谐振腔内部电磁场分布求解基于模式匹配结合

Rayleigh-Ritz 法完成,其基本思想是采用一组正交基函数,对整个封闭金属区域进行电磁场分布重构,得到与各基函数权值相关的一组方程,该方程包含了材料介电常数与腔体谐振频率的精确关系,通过计算可得到介电常数与腔体谐振频率之间的关系,其测量模型剖面图如图2所示。

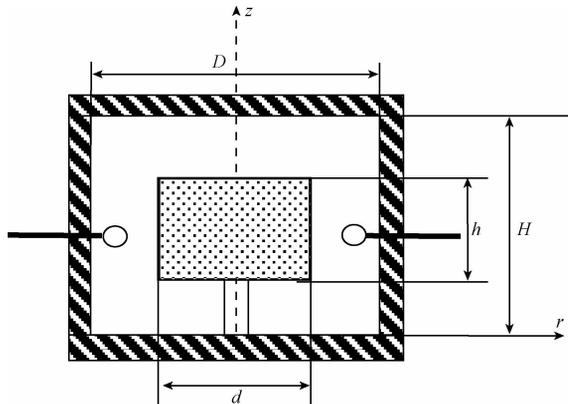


图2 闭式谐振腔法测量模型剖面图

Fig.2 Cross-section of the measurement model for shielded resonant cavity method

由于谐振器是中心对称结构(见图2),其内部电磁场可采用基函数进行模式匹配。其具体方式是,将待求的介质加载条件下电磁场分布展开为一系列基函数的加权和,然后根据图2中的电磁场边界条件,并结合麦克斯韦方程组进行匹配求解。

设腔体内电磁场分布为函数 φ , 利用 Rayleigh-Ritz 方法将待求函数展开为:

$$\varphi = \sum_{n=1}^N \alpha_n \varphi_n \quad (1)$$

式中: $\{\alpha_n\}$ 为待定系数集, $\{\varphi_n\}$ 为基函数集, N 为基函数的数目, 一个完整的基函数集所包含的函数元首先需要满足测量模型所满足的边界条件, 然后其幅度满足正交归一化条件, 满足上述条件的基函数形式不具有唯一性, 可根据需要的谐振腔测量模式选取, 式(1)可进一步表示为:

$$\varphi = \sum_{n=1}^N [\alpha_n^E, \alpha_n^H] \begin{bmatrix} E_n \\ H_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: E_n, H_n 根据正交归一化条件进行计算得到, 基函数满足麦克斯韦方程。

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -j\omega\mu H \\ \nabla \times H &= -j\omega\mu E \end{aligned} \quad (3)$$

结合谐振腔边界条件:

$$\begin{aligned} e_n \times E &= 0 \\ e_n \times H &= J_s \end{aligned} \quad (4)$$

在腔体中构成内积, 可得到线性方程组:

$$\sum_{n=1}^N \left(A_{mn} - \delta_{mn} \frac{1}{\omega^2} \right) \alpha_n^H = 0 \quad (5)$$

式中:

$$A_{mn} = \frac{\iiint_V \varepsilon_{(r,z)} \varepsilon_0 \varphi_n \varphi_m dv}{\omega_m \omega_n},$$

$$\varphi_m = \begin{bmatrix} E_m \\ H_m \end{bmatrix}, \varphi_n = \begin{bmatrix} E_n \\ H_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\varepsilon_{r,z} =$

$$\begin{cases} \varepsilon_r, & 0 < r < d/2, (H-h)/2 < z < (H+h)/2 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω_m, ω_n 为所选用基函数的角频率, ω 为被测样品加载后的腔体谐振角频率, ε_r 为样品材料介电常数, 式(5)给出了介质加载条件下, 腔体谐振频率与介质样品介电常数之间的关系, 当测量得到腔体谐振频率之后, 通过求解式(5), 便可得到所需的介质材料介电常数值, 由于无法得到显示解, 通常采用计算机编制自动求解程序, 并通过多次迭代达到需要的求解精度, 式(5)具有非0解的条件为:

$$\det \left| A_{mn} - \delta_{mn} \frac{1}{\omega^2} \right| = 0 \quad (8)$$

若测量得到了 ω , 式(8)中仅包含待求介电常数值 ε_r , 以 ε_r 的估计值作为初值, 可根据牛顿法进行数值迭代, 求出函数过0点处的 ε_r 值。求解时取得基函数数目 N 越大, 其计算结果越准确, 但是过大的 N 将导致计算量的大大增加, 可依据需求综合考虑, 当 $N > 171$ 时, 计算引入的误差小于0.1%。

得到样品介电常数之后, 可根据谐振点 Q 值计算损耗角, 加载被测材料后, 腔体内损耗由3部分组成, 介质材料的损耗、金属内壁感应电流损耗和介质支撑柱损耗, 当采用 TE_{018} 模式时, 在轴向中心位置电磁场强很小, 由支撑柱引起的介质损耗经计算小于1%, 可以忽略, 因此求得介电常数之后, 可根据谐振点的有载 Q 值, 根据以下步骤求得介质材料的损耗角正切。

$$\tan \delta_d = \frac{Q_L^{-1} - R_s/G}{P_{ed}} \quad (9)$$

式中: Q_L^{-1} 为谐振腔的有载品质因素, 可通过测量得到。 P_{ed} 为谐振腔的场分布因子, $\tan \delta_d$ 为介质材料损耗角正切, R_s 为谐振腔内壁的表面电阻, G 为导电损耗因子。

由于介质谐振腔的结构使绝大部分场集中在被测材料中, 且被测材料与金属壁没有直接接触, 在金属壁附近的场强很小, 大部分情况下可忽略由于金属壁损耗引起

的 Q 值变化,但是在测量超低损耗的介质材料时(1×10^{-5} 以下),需要确定金属腔的电阻值,可通过测量空腔品质因素计算得到, p_{ed} 和 G 通过如下公式计算得到。

$$p_{ed} = \frac{\iiint_{V_s} \varepsilon' E \cdot E dv}{\iiint_V \varepsilon'(r, z) E \cdot E dv} \quad (10)$$

$$G = \omega \frac{\iiint_V \varepsilon'(r, z) E \cdot E dv}{\iint_S |H_t|^2 ds} \quad (11)$$

式中: E 和 H_t 分别为腔体内电场和腔体内表面磁场切向分量, V_s 为介质材料体积区域, V 为谐振腔体积区域, S 为谐振腔内表面。

3 测量装置

测量系统主要由闭式谐振腔、微波电缆、矢量网络分析仪组成,矢量网络分析仪采用 Agilent N5244A,频率准确度 $\pm 1 \times 10^{-6}$,频率分辨率 1 Hz,用于测量闭式谐振腔的微波散射参数,寻找到腔体谐振频率与相应品质因素 Q 值,耦合调节装置用于调节耦合量,避免耦合量过大影响谐振腔内场分布。

设计了 4 个不同尺寸圆柱封闭腔体以测量不同频率点下材料介电常数,腔体尺寸和空腔 TE_{011} 谐振频率如表 1 所示,腔体材质为铝,为保障测量装置满足测量所需电磁场边界条件,谐振腔的内壁要求平整光洁,并在谐振腔内表面进行了镀银处理,以提高表面电导率,减小对于低损耗材料的测量误差,耦合环由带有 SMA 接头的同轴线内导体弯曲制成,支撑柱采用聚四氟乙烯制作,采用 VC++ 编制了自动化测量软件。研制的测量系统实物如图 3 所示。

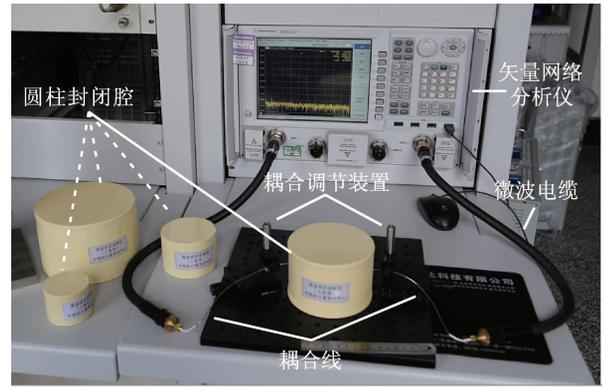


图 3 闭式谐振腔法介电常数测量系统实物
Fig. 3 Picture of the permittivity measurement system with shielded resonant cavity method

表 1 闭式谐振腔参数

Table 1 Parameters of shielded resonant cavities

谐振腔 型号	谐振 模式	谐振 频率/GHz	腔体 直径/mm	腔体 高度/mm
SC3P2G	TE011	3.214 39	139.91	80.09
SC4P4G	TE011	4.421 099	100.12	60.17
SC6P3G	TE011	6.314 427	70.09	42.13
SC8P8G	TE011	8.841 577	50.14	29.98

4 结果与分析

4.1 微波介质陶瓷测量结果及测量不确定度

采用 4 个谐振腔,对 4 种典型的圆柱状微波介质陶瓷样品进行了测量实验,介电常数最小约为 19,最大约为 88,覆盖现有大部分微波介质陶瓷材料介电常数范围,测量结果如表 2 所示。

表 2 典型微波介质陶瓷测量结果

Table 2 Measurement results of typical microwave dielectric ceramics

腔体型号	样品名称	谐振频率/GHz	谐振点 Q 值	介电常数	损耗角正切
SC3P2G	K20	1.459 595	26 200	19.358	3.44×10^{-5}
	K35	1.462 811	17 200	35.479	5.65×10^{-5}
	K60	1.106 140	9 700	61.348	1.02×10^{-4}
	K90	1.021 000	6 200	82.495	1.60×10^{-4}
SC4P4G	K20	1.949 905	21 100	19.426	4.29×10^{-5}
	K35	2.063 140	14 970	35.640	6.47×10^{-5}
	K60	1.524 750	7 000	61.052	1.41×10^{-4}
	K90	1.344 653	4 789	86.842	2.07×10^{-4}

续表2

腔体型号	样品名称	谐振频率/GHz	谐振点 Q 值	介电常数	损耗角正切
SC6P3G	K20	2.854 939	10 900	18.708	8.78×10^{-5}
	K35	3.067 456	11 600	35.622	8.50×10^{-5}
	K60	2.391 711	5 000	61.234	1.99×10^{-4}
	K90	1.981 198	3 600	87.416	2.77×10^{-4}
SC8P8G	K20	4.283 990	11 250	19.782	8.53×10^{-5}
	K35	4.253 663	4 450	35.974	2.24×10^{-4}
	K60	3.062 350	3 900	61.768	2.55×10^{-4}
	K90	2.754 870	2730	87.777	3.65×10^{-4}

由于不同腔体所测量的陶瓷材料为不同批次样品,同一型号陶瓷样品介电常数测量结果存在一定差异,从测量结果可以看出,相比于开式谐振腔法,闭式谐振腔法由于在损耗抑制方面的优势,测量 Q 值较大,相比提高了约 5~10 倍,有利于提高材料损耗测量灵敏度,为验证测量系统稳定性,进行了 10 次重复性测量实验,测量结果如表 3 所示。

表3 K20 陶瓷重复性测量结果

Table 3 Repeatability measurement result of K20 ceramic

测量次数	测量频率/GHz	谐振点 Q 值	介电常数	损耗角正切
1	1.435 573	21 800	18.728	4.29×10^{-5}
2	1.435 561	21 800	18.728	4.29×10^{-5}
3	1.435 707	21 800	18.724	4.29×10^{-5}
4	1.435 617	21 500	18.727	4.36×10^{-5}
5	1.435 686	22 500	18.725	4.17×10^{-5}
6	1.435 511	22 400	18.730	4.17×10^{-5}
7	1.435 609	22 330	18.727	4.18×10^{-5}
8	1.435 593	22 360	18.727	4.17×10^{-5}
9	1.435 663	21 700	18.725	4.31×10^{-5}
10	1.435 590	22 370	18.727	4.17×10^{-5}
相对标准偏差/%	-	-	0.008 8	1.8

从测量结果可以看出,10 次测量结果重复性非常好,介电常数相对标准偏差小于万分之一,损耗角正切测量结果变化主要是由于 Q 值太高,造成矢量网络分析仪在测量 Q 值过程中受噪声影响较大,若打开仪器平均功能,测量重复性还会有较大提升。

表4 闭式谐振腔法标准不确定度分量一览表

Table 4 Standard measurement uncertainty components of shield resonant cavity method

不确定度分量	不确定度来源	分布	不确定度分量/%
u_1	计算方法引入的不确定度	均匀	0.058
u_2	谐振频率测量不准引入的不确定度	均匀	-
u_3	环境温度变化引入的不确定度	均匀	-
u_4	腔体尺寸测量不准引入的不确定度	均匀	0.029
u_5	测量重复性引入的不确定度	正态	0.009

闭式谐振腔法的测量不确定度来源主要从计算方法、仪器溯源性、环境温度、测量重复性几方面考虑。其中计算方法引入的不确定度与所取的基函数数目 N 相关,此处 $N = 171$; 矢量网络分析仪经溯源,频率测量准确度优于 $\pm 1 \times 10^{-6}$, 引入的不确定度可忽略; 环境温度变化对测量的影响主要体现在热胀冷缩造成的腔体尺寸变化,在实验室中,温度变化在 2°C 以内,对结果影响较小可忽略; 闭式谐振腔高度 H 和直径 D 测量测量误差小于 0.01 mm ; 测量重复性前面已做分析。各不确定度评定结果如表 4 所示。各不确定度分量相互独立,合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.065\% \quad (12)$$

扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c = 0.13\% \quad k = 2 \quad (13)$$

4.2 典型微波介质材料测量比对

采用多台比对法完成本套装置的性能验证。被测材料选用 PTFE、蓝宝石、K 系列微波介质陶瓷等典型介质材料,介电常数范围覆盖 1~100。对同一样品,分别采用国内其他 3 家单位的开式腔法测量装置 (A、B、C) 和本单位研制的闭式谐振腔法进行了比对测量,结果如表 5 所示。

表 5 典型介质材料测量比对结果
Table 5 Comparison test results of typical dielectric materials

材料名称	国内 A 装置测量结果		国内 B 装置测量结果		国内 C 装置测量结果		本装置测量结果	
	ϵ_r	$\tan\sigma$	ϵ_r	$\tan\sigma$	ϵ_r	$\tan\sigma$	ϵ_r	$\tan\sigma$
PTFE	-	-	-	-	-	-	2.04	2.5×10^{-4}
氧化铝	-	-	9.21	1.2×10^{-3}	-	-	9.13	1.2×10^{-3}
蓝宝石	-	-	9.45	2.0×10^{-5}	-	-	9.41	7.7×10^{-6}
K20	18.77	7.1×10^{-5}	18.73	4.8×10^{-4}	18.80	3.1×10^{-4}	18.73	4.9×10^{-5}
K35	35.50	8.0×10^{-5}	35.45	2.3×10^{-4}	35.45	1.0×10^{-4}	35.48	8.0×10^{-5}
K65	61.90	3.9×10^{-4}	61.78	2.5×10^{-4}	61.72	2.9×10^{-4}	61.63	1.0×10^{-4}
K90	85.95	5.9×10^{-4}	86.34	3.4×10^{-4}	86.56	3.9×10^{-4}	86.68	1.6×10^{-4}

从比对结果可以看出,对陶瓷材料介电常数 ϵ_r 测量结果一致性较好,而损耗角 $\tan\sigma$ 测量方面,损耗角较大的氧化铝陶瓷一致性相对较好,而对损耗角非常小的材料,闭式谐振腔测量结果明显较低,比如蓝宝石损耗角测量结果可达 10^{-6} 量级,分析主要原因是由于材料损耗较大时,辐射损耗和金属损耗占比较小,对测量结果影响较弱,而当材料损耗很小时,由于闭式腔法不存在辐射损耗,金属电流损耗也较小,因此测量灵敏度和准确度大大提高。

此外在测量范围上,闭式谐振腔相比于开式腔能覆盖更宽介电常数范围,对于介电常数低于 10 的介质材料能进行准确测量,实现低介电常数的介质材料测量,具有更广泛的应用价值^[22-23]。

4.3 NIST 标准介质样品测量比对

为进一步验证闭式腔对低介电常数材料的测量性能,对美国国家标准与技术研究院(national institute of standards and technology, NIST)提供的标准介质材料 SRM2870 开展了比对实验,该材料采用交联聚苯乙烯作为介电常数标准物质,并出具了相应校准证书。该标准介质样品相比于通过烧结工艺得到的微波陶瓷标准样品,其外形尺寸加工控制在 m 级,材料内部均匀性也较好,所以测量不确定度得到了有效控制。标准介质样品如图 4 所示。



图 4 NIST 介电常数标准物质 SRM2870
Fig. 4 NIST permittivity standard reference material SMR2870

表 6 SRM2870 比对测量结果

Table 6 Comparison test results of SRM 2870

材料编号	NIST 测量标准值		闭式谐振腔测量结果	
	ϵ_r	$\tan\sigma$	ϵ_r	$\tan\sigma$
55	2.535 ± 0.004	4.16×10^{-4}	2.533	4.09×10^{-4}
56	2.534 ± 0.004	4.10×10^{-4}	2.534	4.66×10^{-4}

从表 6 中的测量结果可以看出,两套测量系统的测量结果具有非常好的一致性,其中介电常数最大误差小于 0.1%,验证了本装置的测量性能。

5 结 论

随着射频微波技术的飞速发展,微波介质陶瓷、LTCC 介质材料、透波天线罩等各类介质材料的开发与应用越来越广泛,材料特性的准确测量已成为材料研究领域的一项必要内容。本文研究了一种微波闭式谐振腔介电常数测量方法,详细介绍了该方法理论基础,算法实现、测量装置的研制与实验等内容。通过与国内外多家单位开展的比对实验,验证了该装置的性能。相比传统开式腔法,该方法在测量范围、测量准确度等方面具有突出优势,其介电常数测量范围 $\epsilon_r = 1 \sim 100$ 及以上,损耗角正切测量范围 $\tan\sigma = 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6}$,介电常数测量误差在 $\pm 0.1\%$ 以内,适用于各类低损耗介质材料介电性能的准确测量,特别是对于超低损耗的介质材料,损耗角正切测量准确度高。今后将以此为基础开展温度系数 τ_r 测量、材料变温介电常数测量等工作。

参考文献

[1] 杨辉,张启龙,王家邦,等. 微波介质陶瓷及器件研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(10):965-973,980.
YANG H, ZHANG Q L, WANG J B, et al. Progress in microwave dielectric ceramics and microwave

- components [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(10):965-973,980.
- [2] 徐建梅, 周东祥. 微波介质陶瓷的研究现状及发展趋势[J]. 非金属矿, 2001(增刊1):47-49.
XU J M, ZHOU D X. Research status and prospect of microwave dielectric ceramics [J]. Non-Metallic Mines, 2001(Suppl. 1):47-49.
- [3] REANEY I M, IDDLES D. Microwave dielectric ceramics for resonators and filters in mobile phone networks [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(7):2063-2072.
- [4] NARANG S B, BAHTEL S. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: A review [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2010, 11(3):316-321.
- [5] 李恩. 透波材料介电性能高温宽频测试技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009.
LI EN. Study of high temperature and broadband measurement of dielectric properties of microwave transparent materials [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [6] 王益, 张翠翠, 王建忠, 等. 非磁性材料介电常数测量传输反射法改进研究[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(1):5-9,33.
WANG Y, ZHANG C C, WANG J ZH, et al. Improved technique for determining complex permittivity of non-magnetic material with the transmission/reflection method [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 35(1):5-9,333.
- [7] 赵才军, 蒋全兴, 景莘慧, 等. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3):695-700.
ZHAO C J, JIANG Q X, JING SH H, et al. Determining complex permittivity with improved transmission/reflection method using coaxial line [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3):695-700.
- [8] 张磊, 韦高, 毛得明. 基于 VC++ 的介质复介电常数变温测量系统软件设计 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(5):42-44.
ZHANG L, WEI G, MAO D M. Design of variable temperature measurement system software for complex permittivity based on VC++ [J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(5):42-44.
- [9] 徐江峰, 陈秋灵, 倪尔瑚. 截止波导介质腔介电常数测量理论与方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10):1322-1325.
XU J F, CHEN Q L, NI ER H. Research on the method and the theory of measuring permittivity of microwave ceramics by cutoff waveguide dielectric resonator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10):1322-1325.
- [10] SANTRA M, LIMAYE K U. Estimation of complex permittivity of arbitrary shape and size dielectric samples using cavity measurement technique at microwave frequencies [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005, 53(2):718-722.
- [11] YOSHIKAWA H, NAKAYAMA A. Measurements of Complex Permittivity at Millimeter-Wave Frequencies With an End-Loaded Cavity Resonator [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2008, 56(8):2001-2007.
- [12] 徐得名, 李兆年. 微波介质测量仪 [J]. 仪器仪表学报, 1984, 5(4):81-84.
XU D M, LI ZH N. Microwave dielectric measuring apparatus [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1984, 5(4):81-84.
- [13] 陈赐海, 骆超艺, 黄振宇, 等. 微波开放型介质谐振器介电参数的测试 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(增刊1):29-30.
CHEN C H, LUO CH Y, HUANG ZH Y, et al. Measurement of complex permittivity for dielectric ceramics at microwave frequency [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(Suppl. 1):29-30.
- [14] 李怡. Ba_(6-3x)Sm_(8+2x)Ti₍₁₈₎O₍₅₄₎ 高介电常数微波介质陶瓷及其改性 [D]. 杭州:浙江大学, 2002.
LI Y. Ba_(6-3x)Sm_(8+2x)Ti₍₁₈₎O₍₅₄₎ High dielectric constant microwave dielectric ceramics and their modification [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [15] 肖芬, 董晓盈, 陈赐海, 等. 微波陶瓷介质谐振器优选组合检测法 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2):295-298.
XIAO F, DONG X Y, CHENG C H, et al. Optimized combination detection for microwave ceramic dielectric resonator measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(2):295-298.
- [16] 熊兆贤, 肖芬, 薛昊, 等. 微波介质陶瓷器件与测量技术 [J]. 材料导报, 2007(增刊2):187-191.
XIONG ZH X, XIAO F, XUE H, et al. Development of microwave dielectric ceramic device and their measurement techniques [J]. Materials Review, 2007(Suppl. 2):187-191.
- [17] 赵飞. 新型钙钛矿微波介质陶瓷的结构与性能关系研究 [D]. 北京:清华大学, 2009.
ZHAO F. Structure-property relationships for new perovskite-related microwave dielectric ceramics [D].

- Beijing; Tsinghua University, 2009.
- [18] 杨春燕. 几种典型微波介电陶瓷的结构与性能研究[D]. 西安:西北工业大学, 2015.
YANG CH Y. Studies of structures and properties for several microwave dielectric ceramics [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [19] 周东祥, 胡明哲, 姜胜林, 等. 闭腔谐振法测试微波介质陶瓷介电参数[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(8):50-53.
ZHOU D X, HU M ZH, JIANG SH L, et al. Microwave measurement of dielectric properties of ceramics by the closed cavity resonator method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology : Nature Science Edition, 2004, 32(8):50-53.
- [20] 曹良足, 曹达明. 闭腔法测量微波介质材料参数的研究[J]. 电子元件与材料, 2011, 30(12):9-12.
CAO L Z, CAO D M. Study on parameter measurement of microwave dielectric materials by the closed cavity method [J]. Electronic Components and Materials, 2011, 30(12):9-12.
- [21] 陈嘉禾, 卞建江. 无机介质材料的微波介电特性测量[J]. 电子元件与材料, 2007, 26(2):1-4.
CHEN J H, BIAN J J. Dielectric measurement methods for inorganic materials at microwave frequency [J]. Electronic Components and Materials, 2007, 26(2):1-4.
- [22] 黄尧, 刘之景. 新型低介电常数材料研究进展[J]. 微纳电子技术, 2003, 40(9):11-14.
HUANG R, LIU ZH J. Recent research and development of low dielectric constant materials[J]. Micronanoelectronic

Technology, 2003, 40(9):11-14.

- [23] 岑远清, 杜泽伟, 陈梓贤, 等. LTCC 低介电常数微波介质陶瓷的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(12):64-67.
CEN Y Q, DU Z W, CHEN Z X, et al, Research progress of LTCC microwave dielectric ceramics with low permittivity [J]. Electronic Components and Materials, 2010, 29(12):64-67.

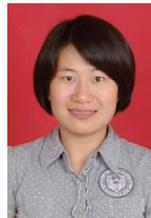
作者简介



王益, 分别在 2009 年和 2012 年于电子科技大学获得学士学位和硕士学位, 现为中国工程物理研究院计量测试中心工程师, 主要研究方向为微波毫米波测试。

E-mail: laowang13579@126.com

Wang Yi received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from University of Electronic Science and Technology of China in 2009 and 2012, respectively. Now he is an engineer in Metrology and Testing Center, CAEP. His main research interest includes microwave and millimeter wave measurement.



张翠翠, 2011 年于电子科技大学获硕士学位, 现为中国工程物理研究院计量测试中心工程师, 主要研究方向为微波器件测试及研制。

E-mail: cuicui_zhang@163.com

Zhang Cuicui received her M. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2011. Now she is an engineer in Metrology and Testing Center, CAEP. Her main research interest includes microwave device test and design.