

微波陶瓷介质谐振器优选组合检测法^{*}

肖 芬¹, 董晓盈¹, 陈赐海², 熊兆贤³

(1 厦门大学物理系 厦门 361005;

2 漳州师范学院物理系 漳州 363000;

3 厦门大学材料系 厦门 361005)

摘 要: 微波介质陶瓷材料的介电性能主要由 3 个参数表示:介电常数、介质损耗和谐振频率温度系数。本文优选组合了 3 种检测介质谐振器方法:短路型介质谐振器轴向的短路界面测定方便准确,用于测量微波介质陶瓷材料的相对介电常数;开路型平行板与介质谐振器无直接接触,用于测量介质损耗系数;自行研制的旋转开放腔,可同时放置多个样品,加快温度系数的测量速度。3 个参数采用 3 种不同测试法,充分应用了不同测试法各自的优势,满足微波介质陶瓷材料介电常数跨度大、介质损耗低、温度系数快速测量的需求,可得到精确、快速的测试效果。

关键词: 介质谐振器; 介电常数; 损耗系数; 温度系数

中图分类号: TN015 TQ174 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Optimized combination detection for microwave ceramic dielectric resonator measurement

Xiao Fen¹, Dong Xiaoying¹, Chen Cihai², Xiong Zhaoxian³

(1 Department of Physics Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2 Department of Physics Zhangzhou Normal University, Zhangzhou 363000, China;

3 Department of Material Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Dielectric properties of microwave dielectric ceramic material are featured in three parameters: complex permittivity, dielectric loss and temperature coefficient of resonant frequency. In this paper, a short-circuited resonator method is developed to measure the complex permittivity of a microwave dielectric material; an open-circuited parallel plate resonator method is developed to measure the dielectric loss due to the fact that the dielectric resonator does not contact the open parallel plates physically; the temperature coefficient of the resonant frequency is efficiently measured in a rotary open resonator cavity designed by ourselves. All the parameters are measured precisely and efficiently by taking the respective advantages of short-circuited and open-circuited methods to satisfy the specific measurement requirements of microwave dielectric material.

Key words: dielectric resonator; complex permittivity; dielectric loss; temperature coefficient of resonant frequency

1 引 言

微波介质陶瓷材料是近 30 年迅速发展起来的新型功能电子陶瓷^[1]。微波陶瓷的介电性能有 3 个主要参数:相对介

电常数 ϵ_r 、介质损耗 $\tan \delta$ 、谐振频率温度系数 f_T 。最为广泛采用的测试方法是短路型介质谐振法,该测试方法首先由 Hakki 和 Coleman 于 1960 年提出,后来又由 Courtney 进行改进,该法也是我国微波陶瓷介电参数测量常用的方法。随着微波介质陶瓷应用范围越来越广,对材料介电性能要求各不

收稿日期: 2006-09 Received Date: 2006-09

* 基金项目: 国家 863 计划 (2001AA325100)、福建省自然科学基金 (11081087)、厦门大学创新基金 (70009) 资助项目

相同,研制的微波陶瓷材料介电性能范围越宽,因而对微波陶瓷材料的测试方法进行创新就越来越迫切。本文通过分析测试原理,比较不同方法的测试结果,并自行开发研制快速的检测夹具,为得到更精确、更宽范围、更快速的测试效果,对组合优选测量方案进行了讨论。

2 测量原理

2.1 短路型介质谐振法测介电常数

短路型平行板介质谐振器是指由两端短路的介质传输线转变而来的谐振器^[2-4],如图 1 所示。

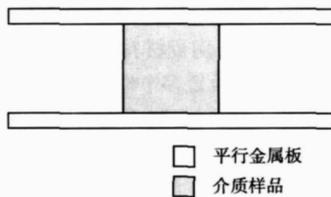


图 1 短路型平行介质谐振器

Fig 1 Short-circuited parallel plate dielectric resonator

利用短路型介质谐振器测试陶瓷样品的介电常数,一般采用介质谐振的 TE_{011} 模,此时有:

$$\frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)}$$

$$v = \frac{-D}{\sqrt{\left(\frac{0}{g}\right)^2 - 1}}$$

式中: $u = \frac{c}{f_0}$, $g = \frac{2L}{l}$, $l = 1, 2, 3, \dots$, $J_n(u)$ 为第一类贝塞尔函数, $K_n(u)$ 为第二类贝塞尔函数, f_0 为谐振频率。

采用介质谐振的 TE_{011} 模,下标第三位为 1,表示谐振器轴向一个半立驻波数 ($g = 2L$),通过测试谐振器的谐振频率 f_0 则可以准确推算出相对介电常数 ϵ_r :

$$\epsilon_r = \left(\frac{0}{D}\right)^2 (u^2 + v^2) + 1$$

2.2 开放型介质谐振法测介电损耗系数

将两端短路型的上下导电板拉开圆柱介质端面,得到开放型平行板介质谐振器^[5-7],如图 2 所示。

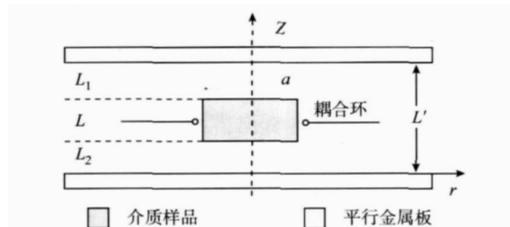


图 2 开路型平行板介质谐振器

Fig 2 Open-circuited parallel plate dielectric resonator

在下底板放置一定高度的聚四氟乙烯样品垫,由于它的介电常数 ($\epsilon_r = 2.0$) 远小于样品材料的介电常数 ($\epsilon_r = 30 \sim 120$),样品垫对数据所造成的误差可以忽略。测量时谐振频率与上下平行板至介质谐振器的距离有关,通常调节样品与上导电板的距离对称。

相对于短路型平行板介质谐振器的 TE_{011} 模而言,此时开路型平行板介质谐振器的主模为 TE_{01} 模。两模式都是轴对称的工作模式,只有 E_z 、 H_r 、 H_z 三个分量,此模具有电场和磁场圆对称,耦合方便,介质谐振器(被测试样品)谐振时,电磁能量存储在样品中,成陷模状态,能量在介质谐振器内集中程度高、 Q 值较高等优点。

介质谐振器的无载 Q_u 值为:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r}$$

式中: Q_d 为表征被测介质材料损耗的品质因数, Q_c 为表征金属导体损耗的品质因数, Q_r 为表征辐射损耗的品质因数。

应用介质微扰理论,可得:

$$Q_d = \frac{1}{\tan \left[\frac{f_0}{2 \left(\frac{-f_0}{r} \right)} \right]}$$

若金属板间距离小于谐振频率对应的自由空间波长,辐射损耗可以忽略,粗测时可直接把 Q_d 当作样品的 Q_u 。

在精确测量时,必须考虑传导损耗,应用微扰理论,可得:

$$Q_{cu} = \left[\frac{f_0}{\left(\frac{-f_0}{L_1} \right)} \right]_c$$

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{2}{Q_{cu}}$$

式中: Q_{cu} 是表征上金属导体传导损耗的品质因数, Q_c 是表征总的传导损耗 Q 因子,系统结构对称,认为上下金属板损耗相等; c 是导体的趋肤深度。

利用网络分析仪测得的有载 Q_L 值和无载 Q_u 值之间的关系为:

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - 10^{(-L/20)}}$$

式中: l 为插入损耗, $l = 20 \lg (1/|S_{21}|)$ 。选择网络分析仪测量传输系数 S_{21} ,同时获得系统的插入损耗,从而推算出无载 Q_u 值,则可获知样品的介电损耗 $\tan \delta$ 。

由于开路法测量时,上下金属半行板没有与介质样品直接接触,因而传导损耗小,对介质损耗测量所造成的干扰最小,所测量的无载 Q_u 值就有可能最接近真值,谐振曲线尖锐,测量范围宽于短路法。

2.3 旋转开放腔测介质温度系数

由于短路型与开路法测试温度系数效率低,通常

3~4 检测一个样品,为了提高检测速度,必须改进开放型谐振腔^[8]。

TE_{01} 模在介质谐振器内呈驻波场,按第一类 0 阶贝塞尔函数变化,在 $r = a$ 的磁壁上, E_r 、 H_ϕ 为 0,所以 $J_0(k_c a) = 0$, $k_{c01} = 2.405/a$ 。在介质谐振器外呈衰减场,按第二类 0 阶变型贝塞尔函数 $K_0(a_c r)$ 变化,是一条趋近于零的衰减曲线。设 A_d 为 $K_0(a_c r)$ 的第一个零点,因为 $a_c^2 = (r - 1)k_0^2 - k_c^2$,可以推得以下关系:

$$r = \frac{A_d}{\sqrt{(r - 1)k_0^2 - k_c^2}} = \frac{A_d}{\sqrt{(r - 1)(2f/c)^2 - (2.045/a)^2}}$$

根据仿真计算 TE_{01} 场分布如图 3 所示可知:

当样品中心点间的距离大于样品直径的 3 倍时,样品间不产生互扰,而将这个结果代入公式,得到的 A_d 可以使函数值趋近于零,符合要求。

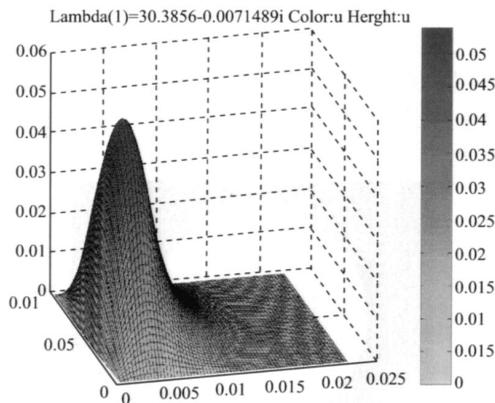


图 3 场仿真图

Fig 3 Field simulation graph

根据恒温箱尺寸及被测样品直径,金属底板上一次可放 8 个样品,带步进电机的旋转开放腔快速测试夹具,如图 4 所示。

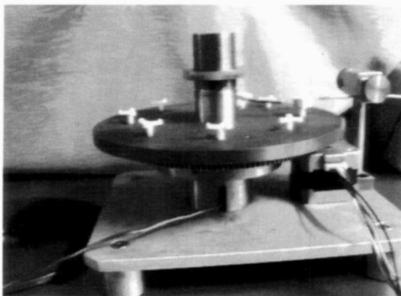


图 4 快速检测夹具的实物图

Fig 4 Picture of the fast measurement fixture

该夹具下平行板上可均匀摆放 8 个同批制作的样

品,该板底部带有环形齿轮,在步进电机控制下可方便地旋转任意角度,测量时可分别在室温及 80 下旋转一圈,逐个完成 8 个样品的检测,代入公式 $f = f_0 / (T \times \alpha)$,获所需谐振频率的温度系数,其单位用 ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) 表示。利用该方法测试介质材料的温度系数,测试时间大约减少为单个测量时间的 1/8。

3 测量结果与讨论

3.1 开放型与短路型测试结果比较

从表 1 数据可以看出,所测结果吻合。采用短路法测量,介质谐振器轴向短路界面准确,计算简洁、方便,适用于相对介电常数的测量;而开路法测量介质谐振器时,其开路型平行板与介质谐振器无直接接触,传导损耗小,谐振曲线明显尖锐,特别适用于高损耗材料和极低损耗材料的 Q 值测量。

表 1 两种测试法结果比较

Table 1 Comparison results of open and short circuited dielectric resonator methods

样品	电子科大短路法测		短路型方式测量		开放型方式测量	
	r	$f_0 \times Q$ GHz	r	$f_0 \times Q$ GHz	r	$f_0 \times Q$ GHz
1	36.89	44.667	36.74	44.878	36.94	50.967
2	89.70	6.839	89.54	7.003	89.60	7.343
3	36.37	53.202	36.42	54.040	36.24	57.038
4	82.86	8.541	83.13	8.500	83.10	8.531

3.2 测量结果重复性

对某一样品的 3 个主要参数,以各自对应的优选测量方法进行了多次测量,结果列入表 2 中,重复测量的相对误差分别为: r/r 0.01%、 $\tan \delta / \tan \delta$ 0.23%、 f/f 1.1%。由此可见,3 种方法重复性都较好。

表 2 单样品多次测量结果

Table 2 Measurement results of a single sample

次数	r	r	$\tan \delta$	$\tan \delta$	f	f
			$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	$10^{-6} \cdot ^{-1}$	$10^{-6} \cdot ^{-1}$
1	108.01		80.81		-12.6	
2	108.02		80.82		-12.7	
3	108.01	108.01	80.49	80.68	-12.7	-12.66
4	108.00		80.45		-12.8	
5	108.01		80.82		-12.5	

4 结 论

经理论分析及检测结果比较,采用短路型平行板介

质谐振器轴向驻波电场长度准确测定优势,测量微波介质陶瓷材料的相对介电常数;采用开路型平行板无直接与介质谐振器接触的优势,测量介质损耗系数;采用自行研制的旋转开放腔,加快温度系数的测量速度。3种方式优势组合测量,满足微波介质陶瓷材料介电常数跨度大、介质损耗低、温度系数快速测量的需求,可以获得精确、快速的测试效果。

参考文献

- [1] COURTNEY W E Analysis and evaluation of a method of measuring the complex permittivity and permeability of microwave insulators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1970, 18 (8): 476-482
- [2] XIAO F, CHEN R, HUANG ZH Y, et al Two methods for the measurement of complex permittivity of microwave dielectric ceramics [J]. Key Eng Mater, 2005, 280 ~ 283: 61-64.
- [3] ZHENG X D. High complex permittivity microwave dielectric ceramics [J]. Shan Dong Ceramics, 2004, 27 (6).
- [4] XIAO F, X DNG ZH X, HUANG ZH Y, et al Automatic calibration and measurement for microwave ceramic materials [J]. Rare Metal Materials And Engineering, 2007, 36 (1): 527-530.
- [5] TANG Z X Measurement of frequency response and temperature coefficient of dielectric resonator [J]. Journal of Measurement, 2002, 23 (1): 57-61.
- [6] JAWORSKIM, POSPIESZALSKIM W. An accurate solution of the cylindrical dielectric resonator problem [J]. IEEE Trans MTT, 1979, 27: 639-643.
- [7] XIAO F, LUO CH Y, CHEN C H. A method for solving the complex permittivity of the microwave dielectric resonator [J]. Research & Progress of SSE, 2007, 27 (2): 226-229.

- [8] XIAO F, DONG X Y, YANG G SH, et al Fast and new measurement system of temperature coefficient for open dielectric resonator [J]. Research & Progress of SSE, Aug, 2007, 27 (3): 347-349.

作者简介



肖芬, 1975年毕业于福州大学物理无线电工程系, 现为厦门大学物理学系副教授, 主要研究方向为微波理论及应用。

地址: 福建省厦门大学物理学系, 361005

E-mail: xiaofen@xmu.edu.cn

Xiao Fen graduated from Department of Physics and Radio Engineering, Fuzhou University in 1975. Now she is an associate professor in Department of Physics, Xiamen University. Her research interests include microwave theory and application

Address: Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China

E-mail: xiaofen@xmu.edu.cn

本刊 2007 年第 6 期 1132 页图 8 (郑毅, 刘上乾: 利用直线特征的定标图像非线性畸变校正) 有误, 应为下图, 特此更正。

