

# 微波介质谐振器温度系数的快速检测系统\*

肖芬<sup>\*\*</sup> 董晓盈 杨国山 刘同赞

(厦门大学物理系, 福建, 厦门, 361005)

2006-04-04 收稿, 2006-11-15 收改稿

**摘要:** 谐振频率温度系数是微波介质陶瓷材料的重要性能参数之一, 文中提出了一种微波介质谐振器温度系数的新型快速检测方法, 并介绍了系统的测试原理、电路结构和软件组成。该系统对微波陶瓷材料温度系数进行测量时, 所产生的系统误差、人为误差最小, 可实现精确和快速检测。

**关键词:** 介电参数; 开放介质谐振器; 快速检测

**中图分类号:** TN 015; TQ 174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2007)03-347-03

## Fast and New Measurement System of Temperature Coefficient for Open Dielectric Resonator

XIAO Fen DONG Xiaoying YANG Guoshan LU Tongzan  
(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361005, CHN)

**Abstract:** Resonant frequency temperature coefficient is an important property parameter of the microwave dielectric ceramic materials, a fast and new measurement system for temperature coefficient of microwave dielectric resonator is presented. The principle and circuits as well as, software of measurement system is introduced. It is shown that the system has low system error and manmade error, and can measure the temperature coefficient of microwave ceramic materials accurately and fast.

**Key words:** dielectric parameter; open dielectric resonator; fast measurement

**EEACC:** 1300

## 1 引言

微波介质陶瓷材料的谐振频率温度系数表示环境温度变化时, 谐振中心频率的相对偏移量, 该系数是微波介质陶瓷材料介电性能的重要参数之一。随着电路的集成度提高, 元件密度增大, 单位体积上产生的热量越来越多, 因而电路对器件性能的温度稳定性要求越来越高, 精确快速的检测材料的温度系数显得越来越重要<sup>[1]</sup>。

频率温度系数的测量方法是将有介质谐振器样品的测试夹具放入自动控温箱, 选择合适的起始温度, 记录此时介质谐振器样品TE<sub>01δ</sub>模的谐振频率 $f_{01}$ 。改变控温箱的温度, 则介质样品的TE<sub>01δ</sub>模的谐振频率会随温度变化而发生变化, 直至终止温度, 记录此时TE<sub>01δ</sub>模的谐振频率 $f_{02}$ 。被测介质谐振器的频率温度系数 $\tau_f$ 由下式算得:

$$\tau_f = \frac{f_{02} - f_{01}}{f_{01}(T_2 - T_1)}$$

常用的测试陶瓷材料的介电常数的方法是短路

\* 基金项目: 国家863计划资助项目(2001AA325100); 福建省自然科学基金计划资助项目(J0650016)

\*\* 联系作者: E-mail: xiaofen@xmu.edu.cn

介质谐振器法<sup>[2]</sup>,其测试频率温度系数的过程效率很低,通常3~4个小时只能检测一个样品。为了提高检测速度和精度而开发了一种新型的开路介质谐振器的温度系数快速检测系统。

## 2 温度系数的快速测试装置

微波介质陶瓷材料的温度系数快速检测装置包括:带步进电机的开放型平行板谐振腔、单片机控制及步进电机驱动器、矢量网络分析仪、恒温箱及计算机等,以及相配套的测试软件组成。通过编程,在计算机和单片机的控制下对测量数据进行实时采集、理论运算、误差分析、结果显示和保存。如图1所示。

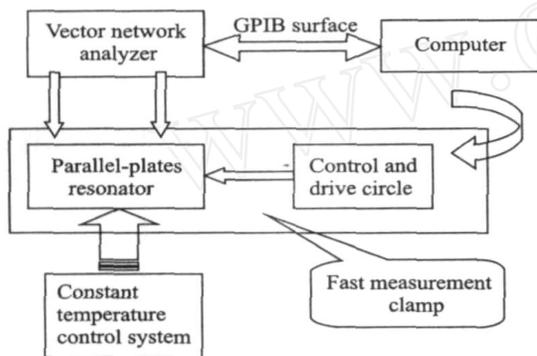


图1 微波陶瓷材料快速测量系统框图

Fig. 1 Sketch map of fast measurement system for microwave ceramic materials

### 2.1 测试系统的硬件组成

2.1.1 带步进电机的开放型平行板谐振腔 为了解决一次测试多个样品的问题,提出转动腔的思路。上下两个镀银的紫铜平行板构成开放型谐振腔,下平行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,如图2所示。

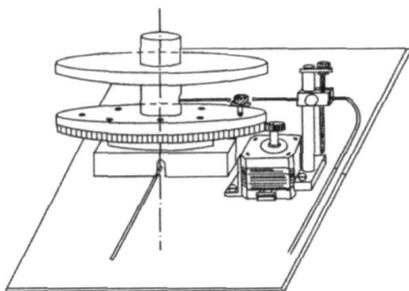


图2 检测夹具的立体图

Fig. 2 Solid picture of measurement clamp

由于微波陶瓷材料介电常数较高,工作模式是俘获态,电磁场能量集中在介质内,而介质外沿径向

电磁场按指数率迅速衰减,当金属板的直径大于样品直径的6倍左右,则金属板可近似为无限大,忽略有限板对测试结果的影响。同时考虑到相邻样品对电磁场的干扰,样品摆放间距有一定的要求。当工作模式 $TE_{01\delta}$ 在介质谐振器内按第一类贝塞尔函数 $J_0(k_c r)$ 变化时,在 $r = a$ 的磁壁上, $E_r, H_\phi$ 为零,得 $J_0(k_c a) = 0$ ,对于 $TE_{01\delta}, k_{c01} = 2.405/a$ 。 $TE_{01\delta}$ 模在介质外的衰减按第二类0阶贝塞尔函数 $K_0(a_c r)$ 变化, $a_c^2 = (\epsilon - 1)k_0^2 - k_c^2$ 。设 $\eta_1$ 是0阶的第一个零点,利用 $r = \frac{\eta_1}{a_c} = \frac{\eta_1}{\sqrt{(\epsilon - 1)k_0^2 - k_c^2}}$ 可计算出相邻样品的最小间距,该数值与样品的介电参数、谐振频率及尺寸等有关。经估算,样品介电常数 $\epsilon = 30 \sim 120$ 时,样品间距不小于样品直径3倍,样品间不产生互扰。在实际的测量中,当样品之间的距离大于直径的2倍时,互扰已不存在。因此在下平行板均匀地钻8个小孔,插入聚苯乙烯材料制作的丁字型样品垫,该样品垫的介电常数( $\epsilon = 2.0$ )远小于被测样品的介电常数,对谐振频率的干扰较小,此外被测材料的温度系数计算值仅与频率差有关,因此样品垫造成的影响可以忽略。

步进电机由单片机控制,即给步进电机加一个脉冲信号,电机则转过一个步距角。这一线性关系的存在,加上步进电机每转一圈步距累计误差为零等特点,用步进电机来控制位置变得非常容易。在测量中采用步距角较小的四相八拍电机(0.9°/步),进一步提高定位精度,使得步进电机能够准确平稳地带动转盘,系统的检测控制过程更加方便。

2.1.2 单片机控制电路 该电路采用低功耗、高性能CMOS 8位的标准型8051单片机,由独立式中断键盘输入指令产生脉冲信号。输入指令及运行状态由LED显示,显示电路由DM74LS244N接口电路及DS75452N功率驱动电路组成,以满足LED平均电流10~20mA的需要。

2.1.3 步进电机驱动电路 由单片机输出的控制信号首先经过PC817光电耦合管,再经非门倒相送至D1861达林顿放大管的基极,当达林管导通时,输出的大电流驱动步进电机转动。单片机控制与步进电机驱动电路如图3所示。

### 2.2 测试系统的软件组成

为使系统结构清晰简洁,一般可采用组件化设计思想,将各部分彼此独立的软件单元分别制成标准的组件,然后按照系统的总体要求组成完整的应用系统。

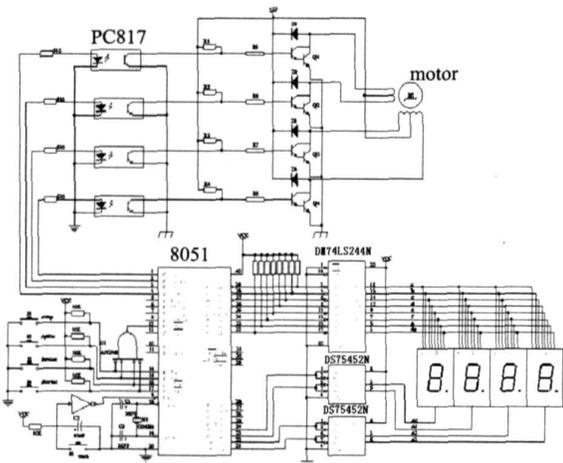


图3 单片机控制与步进电机驱动电路

Fig 3 Circuit of SCM controlling and stepper motor driving

2.2.1 单片机控制步进电机的驱动程序 本部分程序由汇编语言实现, 基本功能有: 四个档位的电机速度调整, 电机的正反转控制, 连续运行和微调中的单步调整, 以满足测试过程中的各种需求。

2.2.2 自动化测试程序 自动测试软件采用 Agilent 公司的 VEE 图形化编程软件实现。通过自动测试软件对矢量网络分析仪进行控制, 测试数据的读取、运算、误差处理及测试结果的显示。

### 3 快速检测的方法

首先校准微波网络分析仪, 启动陶瓷材料的温度系数的测试软件, 输入样品的相关信息, 即样品的直径 $D$ , 高度 $H$ 。将带步进电机的开放型平行板谐振腔放入恒温箱中, 同批制作的样品逐一摆放在下平行板的丁字型样品垫上, 取样品垫的高度为 $(0.5 \sim 1)H$ , 并将耦合环平行调整至样品两侧, 调整上平行板的高度, 在谐振正常的前提下, 尽可能地调高上板与样品的距离。

启动步进电机, 逐一测量温度 $T_1$ 下的每一个样品。由于设计的 VEE 程序中添加了自动校准模块, 首先搜索 $TE_{01\delta}$ 谐振峰(通常为最低次模), 并以此为基准, 计算高次模的频率, 再继续搜寻其它高次模的谐振峰, 由于模式越高谐振峰越弱, 因此只要搜索到四个以上的谐振峰, 程序就可判定基模 $TE_{01\delta}$ 搜索正确, 电脑将记录和保存样品的谐振曲线、谐振频率以及品质因数, 程序会迅速地算出材料的介电常数和损耗系数, 并自动填入每一个样品的表格内。再次设置终止温度 $T_2$ , 重复 $T_1$ 下采样、计算和存储的测试步骤。当测试结束以后, 进入材料温度系数的计算程

序, 程序将自动读取温度 $T_1$ 和 $T_2$ 下所测的谐振频率值, 从两频率差与温差的比值得到所需的温度系数。测试的主要流程如图4所示。

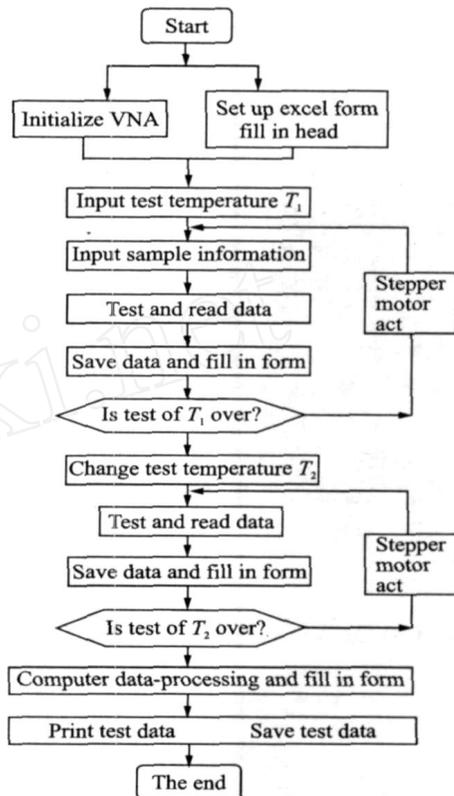


图4 快速检测程序流程

Fig 4 Program flow of fast measurement

程序运行过程中显示谐振曲线与计算介电常数和介质损耗的界面如图5, 程序运行最终得到温度系数的界面如图6。

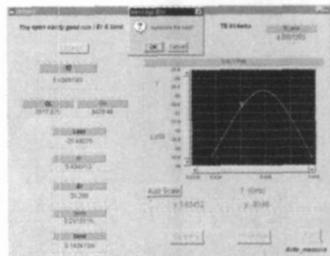


图5 显示谐振曲线的界面

Fig 5 Interface of resonant curve

同时将短路法测试的数据与开路法所测的数据进行比较, 列为表1。

表1 短路法与开路法的比较

Tab 1 Comparison of measurement results

Sample	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
$\tau^*/\text{ppm}$	- 18	62	15	8.2	- 8
$\tau/\text{ppm}$	- 19	60	15.7	8.8	- 7.3
Error	0.06	0.03	0.05	0.07	0.09

(下转第365页)

- [6] 鲍尔J, 布哈蒂亚P. 微带天线[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985: 49
- [7] 林昌禄, 陈海, 吴为公. 近代天线设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990: 593
- [8] 毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.



郭兴龙(GUO Xinglong) 男, 1972 年生, 博士研究生, 主要研究领域为微机电机械系统, 基于MEMS 开关可重天线与硅基MEMS 可重构微小天线的仿真设计和研究制作。



蔡 描(CA IM iao) 女, 1982 生, 硕士研究生, 2004 年获华东师范大学通信专业学士学位, 现主要研究方向为射频MEMS 器件。



赖宗声(LA I Zongsheng) 男, 1943 年生, 终身教授, 博士生导师, 享受政府特殊津贴; 华东师范大学电子电路与系统研究所所长, 上海市电子学会副理事长, 主要从事 VLSI 设计与射频集成电路、RF MEMS 器件等研究工作。

(上接第 349 页)

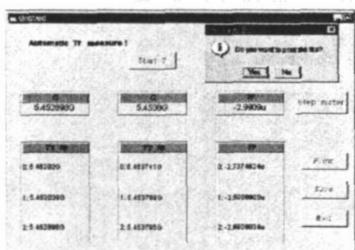


图 6 程序运行的最终界面

Fig. 6 Final interface of program

表 1 中带 \* 号为短路法测试数据, 两种方法吻合较好, 平均误差约为 6%。并对样品进行重复检测, 短路法重复误差约为 2.3%, 开路法重复误差为约 1.1%, 显示开路系统测量温度系数的稳定性更好。

## 4 结 论

带步进电机的新型开放介质谐振器法测试陶瓷材料的温度系数的优势首先是测试速度快, 克服了短路型平行板谐振法一个样品升温一次, 测量耗时长的缺点, 使测试时间大约减少为原有的八分之一。其次, 该测量法将短路型平行谐振腔改为开放型平行谐振腔, 样品与金属平行板未直接接触, 传导损耗降为最小<sup>[3]</sup>, 此时 Q 值更高, 谐振峰更尖锐,  $f_0$  的测定数据更加精确。样品摆放之后, 所有步骤进入自动测试状态, 不同温度下测量时样品的外界条件完全

一致, 系统误差和人为误差最小。该系统虽然为快速测试陶瓷材料的温度系数而研制, 但若将插入损耗值采集和计算, 就可以同时实现介电常数和介质损耗的测试, 迅速完成被测样品三个主要参数的全测试。综上所述, 文中所研制的温度系数快速检测装置系统误差和人为误差最小, 可实现陶瓷材料温度系数的快速和精确的测量。

## 参 考 文 献

- [1] 吕文中. 平行板谐振法测量微波介质陶瓷介电性能[J]. 电子元件与材料, 2003, 22(5): 4-6
- [2] 唐宗熙. 介质谐振器介电参数频响特性及频率温度系数的测量[J]. 计量学报, 2002, 23(1): 57-61.
- [3] 陈赐海. 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(8s): 29-30



肖 芬(XIAO Fen) 女, 1951 年生于福建漳州, 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。



董晓盈(DONG Xiaoying) 女, 1982 年生于黑龙江省鸡西市。2005 年毕业于厦门大学电子信息科学与技术专业, 获学士学位, 现攻读该专业的硕士学位, 研究方向为微波理论及应用。