

学校编码: 10384  
学号: 33120131152849

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

# 微波陶瓷介质谐振器的测量研究

## Study on Measurement for Dielectric Property of Microwave Dielectric Resonator

李学漪

指导教师姓名: 肖 芬 教授  
柳清伙 教授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2016 年 6 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘 要

微波介质陶瓷材料是近几十年发展起来的一种新型的功能电子陶瓷，主要用于微波频段电路中完成一种或多种功能的陶瓷材料，是制造微波介质谐振器和滤波器的关键材料，它具有高介电常数，低介电损耗，温度系数小等优良性能适用于制造多种微波元器件，能满足微波电路小型化，集成化，高可靠性，低成本的要求。在电子对抗，导航，通信，雷达，家用卫星直播电视接收器和移动电话中得到了广泛应用。

微波介质陶瓷材料是电介质材料的一种，具有电介质材料的基本性质。其介电性能可用介电常数 $\epsilon_r'$ ，品质因数  $Q$ （或损耗角正切）、谐振频率温度系数三个主要性能参数衡量。由于微波介质材料不同，所采取的测试方法和测试系统也不同，主要使用的方法有传输法，传输线终端法，时域法和谐振法。本论文主要研究低耗介质材料的谐振法测量。

本文研究并研制了一套自动化程度高，测试速度快，测试准确度高的平行板开路法的自动测试系统，从硬件及软件都给予了更新改进，实现了同时测量多个陶瓷材料温度系数的快速检测，并研制了多套配套软件系统，以满足不同测试需求。经大量测试表明，用开路法测量温度系数的最大标准偏差为  $0.110 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。文中还开发及研制了一套微型，快速检测低耗介质材料的圆柱型介质谐振腔的自动测试系统。相较平行板短路法/平行板开路法，该系统具有尺寸更小，使用过程中不必校准，携带方便以及测试精确的特点，经反复测试表明，其在测量高介质的介质材料时更为准确， $\epsilon_r'$ 精度可达到 $\pm 0.5$ 。由于谐振腔的封闭性，使用该方法可实现零度以下的温度系数的检测。

**关键词：** 介质谐振器 介电常数 温度系数

厦门大学博硕士学位论文摘要库



## Abstract

Microwave dielectric ceramic material (MWDC) is developed in recent decades as a new functional material of electronic ceramics. It is mainly used in microwave circuits as dielectric materials and the completion of one or more functional ceramic material. It is the key materials for microwave dielectric filters and resonators. It is expected that MWDC should have high relative permittivity, high quality factor and adjustable temperature coefficient of resonant frequency. It is widely applied in manufacturing kinds of microwave components. In the electronic countermeasure, navigation, communication, radar, home satellite TV receiver and mobile phone it has been widely used.

Microwave dielectric ceramic material is a kind of dielectric material, which has the basic properties of electrolyte materials. The basic dielectric materials theory is also suitable for dielectric ceramic material. Microwave ceramics material is a kind of ceramic material which is used in the microwave band dielectric. Three main dielectric performance parameters, which is the dielectric constant  $\epsilon_r$ , the quality factor  $Q$  (or loss tangent), temperature coefficient of resonant frequency, measure the dielectric properties of the material.

As the size and the physical state of dielectric materials differs. Different test methods and test system are adopted to measure the material. So far, the transmission method, transmission line terminal method, time domain method and harmonic method are mainly used to measure the dielectric properties.

In this paper, we study a set of high degree of automation, fast testing speed, accurate testing with a high degree of parallel plate open method of the automatic test system. This paper also developed a miniature testing system of cylindrical dielectric resonator for rapid detection of low dielectric materials. The system has the characteristics of smaller size, portable measurement and testing more accurate.

**Key Words:** Dielectric Resonator; Complex Dielectric Constant; Temperature Coefficient

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 目录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 国内外发展动态 .....	1
1.2 微波介质陶瓷的主要介电性能参数 .....	3
1.3 介质谐振器的测量技术 .....	4
1.4 主要内容及其意义 .....	6
<b>第二章 平行板开路法的微波陶瓷快速检测系统</b> .....	9
2.1 平行板开路法测量理论 .....	9
2.2 平行板开路法测量系统的构建 .....	10
2.3 本章小结 .....	18
<b>第三章 截止闭腔开路式圆柱介质谐振法</b> .....	19
3.1 圆柱谐振腔的基本理论 .....	19
3.2 微波介质谐振腔理论 .....	21
3.3 HFSS 微波介质谐振腔的仿真设计 .....	25
3.4 本章小结 .....	28
<b>第四章 基于 VEE 的自动测试系统设计</b> .....	29
4.1 VEE 虚拟仪器技术设计平台 .....	29
4.2 快速检测温度系数的编程与算法 .....	32
4.3 温度系数快速检测系统的构建与实现 .....	39
4.4 圆柱腔测微波陶瓷介质材料介电性能的编程与算法 .....	40
4.5 圆柱腔测微波陶瓷介质材料介电性能系统的构建与实现 .....	48
4.6 本章小结 .....	50
<b>第五章 测试结果分析与误差讨论</b> .....	51
5.1 平行板开路法测微波介质材料的温度系数的实验结果 .....	51
5.2 圆柱型介质谐振法仿真结果 .....	53

5.3 圆柱型介质谐振法实验结果分析与误差讨论 .....	55
5.4 本章小结 .....	58
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>59</b>
6.1 总结.....	61
6.2 展望.....	59
参考文献.....	60
硕士研究生期间科研成果 .....	63
致 谢.....	64

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# Contents

<b>1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1 Background and Research Survey of Paper .....	1
1.2 Major Transmission Parameters .....	3
1.3 Technology of Microwave Measurement .....	4
1.4 Main Content of Paper .....	6
<b>2 Rapid System of Parallel Plate for MCWMs</b> .....	<b>9</b>
2.1 Basic Theory of Parallel Plate Method .....	9
2.2 Components of Parallel Plate Sysytem .....	10
2.3 Summary .....	18
<b>3 Measurement of Cylindrical Cavity</b> .....	<b>19</b>
3.1 Basic Theory of Cylindrical Cavity .....	19
3.2 Basic Theory of Microwave Dielectric Resonator .....	21
3.3 Design and Simulation Based on HFSS .....	25
3.4 Summary .....	28
<b>4 Automatic Test System Based on VEE</b> .....	<b>29</b>
4.1 VirtualInstrument .....	29
4.2 Algorithm for Fast Detection of Temperature Coefficient .....	32
4.3 The Construction of the Rapid System .....	39
4.4 Algorithm for Cylindrical Cavity .....	40
4.5 The Construction of Cylindrical Cavity .....	48
4.6 Summary .....	50
<b>5 Results and Analysis</b> .....	<b>51</b>
5.1 Results of Parallel Plate Method .....	51
5.2 Results of Simulation Based on HFSS.....	53
5.3The Factors to Affect the Accuracy of Results .....	55
5.4 Summary .....	58

<b>6 Summary and Forecasting .....</b>	<b>59</b>
<b>6.1 Summary.....</b>	<b>61</b>
<b>6.2 Forecasting.....</b>	<b>59</b>
<b>References.....</b>	<b>60</b>
<b>Publication During Master Study .....</b>	<b>63</b>
<b>Acknowledgments.....</b>	<b>64</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 第一章 绪 论

## 1.1 国内外发展动态

微波介质陶瓷 (Microwave Dielectric Ceramics) 是指在微波电路中, 作为介质材料用于实现完成一种或多种功能的陶瓷。微波陶瓷材料是近几十年来, 慢慢发展起来的一类新型电子功能材料。用微波陶瓷材料制作的微波介质器件, 具有介电常数高、低损耗、谐振频率温度系数小且易于小型化的特点。同时, 微波介质陶瓷材料的成本低廉, 是一种经济的电子元器件材料。因此, 微波介质陶瓷材料在微波通信领域有着广泛的应用。

20 世纪 70 年代, Raytheon 首次研制成功了 Ba-TiO<sub>2</sub> 系统微波介质陶瓷材料, 它具有低损耗、温度稳定性好的优点。1971 年, 日本 NHK kanishi 利用正、负温度系数材料组合制作出温度系数稳定的微波介质谐振器, 并将这一成果公布于世。随后, 1975 年, 美国贝尔实验室进一步改进了 Ba-TiO<sub>2</sub> 系统的微波介质材料。1977 年, 日本村田研制出一种新系统的微波介质陶瓷, 即 (Zr-Sn) TiO<sub>4</sub> 系统微波介质陶瓷, 它具有 Q 值高以及温度系数低的特点。(Zr-Sn) TiO<sub>4</sub> 系统微波介质陶瓷的出现宣告微波介质陶瓷开始正式走向实用阶段。

随着科技的迅猛发展, 现代通讯技术飞速发展, 信息化、网络化正成为全球经济的发展趋势, 微波陶瓷<sup>[1][2]</sup>作为一种重要的电子功能材料, 其发展直接影响着科技的进步与发展, 因此, 对于微波陶瓷材料的研究和开发仍将是我国乃至世界发展的方向之一。微波器件多层设计思想的提出, 微波器件工作高频化多频化进程的加快, 以及对器件小型化的迫切需求日益突出等变化, 使得微波陶瓷材料领域产生了新的研究热点, 这其中包括: 传统微波介质陶瓷的低温烧结以及中低温烧结微波介质陶瓷新体系的开发; 高介电常数微波介质<sup>[3]</sup>新体系探索; 微波介质陶瓷低损耗的极限与超低损耗; 频率捷变微波介质陶瓷等一系列课题。

就目前而言, 对于微波介质陶瓷的应用主要有两大类, 一类是作为介质谐振器用, 进而构成多种功能器件。另一类是作为微波集成电路等的介质基板、介质

波导线路、介质天线及高介电常数陶瓷，以实现谐振器小型化。微波陶瓷介质材料可用于制造介质滤波器、微波介质振荡器、双工器等微波器件，在蜂窝移动通信、无线局域网、无绳电话、微型通信等现代通信系统中，这些器件被广泛应用。总之，在通信领域，微波介质陶瓷材料将发挥越来越大的作用。

综上所述，微波陶瓷材料是一种应用前景佳的电子信息功能材料，高速发展的无线通信产业为微波介质陶瓷器件的应用提供了十分广阔的市场。

微波陶瓷作为一类电介质材料，遵循电介质的物理特性，以电极化的方式响应电场的作用。其主要性能参数有介电常数 $\epsilon'_r$ 、介质损耗 $\tan\delta$ （和品质因数 $Q_f$ 成反比），以及温度系数 $\tau_f$ ，结合以上三个介电性能指标的高低，可决定微波谐振器的可行性。寻求高介电常数 $\epsilon'_r$ 、高品质因数 $Q$ 和低温度系数 $\tau_f$ 的材料以用来发展多层片式的微波元器件一直是研究的热点。经过近年来迅速发展，微波陶瓷材料已经成为制造微波介质天线<sup>[4]-[7]</sup>、滤波器<sup>[8][9]</sup>、谐振器和鉴频器等器件的关键材料。而这些材料在实际应用之前，建立起精确的检测测试系统是十分必要的，这正是本论文研究的重点和意义。

由于被测介质材料的外形尺寸、物理状态各异，故针对不同介质材料采取的测试方法和测试系统也不尽相同，目前，主要使用传输法、传输线终端法、时域法和谐振法等检测介质材料介电性能。每种测试方法都有其自身的测试使用范围以及优缺点。

传输法的优点是测试频带宽，操作简单且同时对波导系统和同轴系统均适用，但是该方法也存在很多缺点。第一，对于低损耗的材料，当样品厚度小于系统中样品中的半个波导波长时，会使得测量的不确定度增大，最终导致复介电常数的测试不确定度较大，并且，当样品厚度正好是半个波导波长的整数倍时，系统中会产生厚度谐振；第二，该方法还存在多值性问题；第三由于“极薄”样品增大了测量的不确定度，因此，已有的传输法不能实现对“极薄”样品的较高精度的测量。

传输线终端法和时域法，它们的共同特点是具有较宽的测试频带，不足之处是对于常用的低耗介质材料的测试灵敏度较低，测试误差大。

谐振法<sup>[10]</sup>对于低耗介质材料的测试有灵敏度高、测试精度高，且为无损检测。



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.