

A Review of Measuring Methods of Electromagnetic Parameters under High-Temperature

Peipei Wang, Qun Wang, Zhanghong Tang, Yongqing Li

Beijing University of Technology, Beijing
Email: wangpp@emails.bjut.edu.cn

Received: Apr. 30th, 2018; accepted: May 15th, 2018; published: May 22nd, 2018

Abstract

During the application of microwave dielectric materials, electromagnetic parameters of the dielectric materials will change under the influence of service conditions. Hence the accurate measurement of electromagnetic properties under the variation of temperature becomes critically important. This paper mainly introduces the commonly used methods of variable temperature permittivity measurement. Also the basic principles and development of numerous testing methods are presented respectively.

Keywords

Variable Temperature, Complex Permittivity, Microwave Measurement

高温微波材料电磁参数测量方法综述

王佩佩, 王 群, 唐章宏, 李永卿

北京工业大学, 北京
Email: wangpp@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2018年4月30日; 录用日期: 2018年5月15日; 发布日期: 2018年5月22日

摘 要

在微波介质材料使用过程中, 由于使用环境的影响, 介质材料的电磁参数会发生变化, 准确测量变温情况下的电磁参数成为重中之重。本文主要介绍变温介电常数的常用方法进行了综合论述。然后分别介绍了几种测量方法的基本原理以及发展概况。

关键词

变温, 介电常数, 测量

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科学技术的发展, 微波介质材料已经广泛的应用于航空航天、国防军工、微波通信、大功率天线罩等各个领域, 材料的电磁特性对于微波材料的传播起到至关重要的作用。由于工作环境的影响, 介质材料的使用环境会发生一定的变化, 同样的材料的电磁参数也会发生一定的变化。由于使用频段的不同以及使用环境的变化, 如果不能得到准确的材料电磁参数, 就会严重影响卫星通讯以及航空航天领域的正常使用。例如天线窗口就是一个很典型的例子, 作为天线窗口, 通常需要在不同的环境温度下工作, 因此材料的电磁性能随温度变化的知识在天线窗口的特殊设计中非常重要。

针对高温情况下材料电磁参数的测试, 国内外已经有众多学者做出了相当大的努力, 针对不同的测试样品和测试环境, 有不同的测试方法, 每一种方法对应的都有不同的优劣性。按照测试原理的不同, 我们可以将其分为两大类, 网络参数法和谐振腔法。网络参数法原理是将样品和其传输线视为单端口或二端口网络, 利用不同传输线或者自由空间法进行测量网络参数~散射参数, 最终求得介质材料电磁参数。而谐振腔法是将样品放置于封腔体或开放腔体中, 利用样品放置前后, 谐振腔内电磁特性变化情况~包括品质因数或者谐振频率的变化计算出材料的电磁参数。

2. 网络参数法

网络参数法由于测试夹具简单, 且测试精度较高, 所以对于常温测试应用比较广泛。当将此种方法运用于高温测试时, 需要研制适用于高温测试的测试夹具。网络参数法可以按照传输路径的不同, 依次分为传输反射法、自由空间法、终端短路/开路法等。

2.1. 反射法

在反射法过程中, 电磁波射向待测样品, 在确定的参考平面下, 可以由反射系数得到样品的材料性能。在实际测试的过程中, 材料性能的特征通常可以用两个类型的反射, 即开路反射和短路反射。

2.1.1. 开路反射法

见图 1 所示, 是开路反射法的测量结构。在实际测试的过程中, 电磁波从传输线内部发出, 在材料界面处发生反射, 通过测量样品的反射系数得出材料的性能。

1993~1996 年间 M. Arai [1] [2] 介绍了能够进行室温~1200℃ 的同轴线终端开路法测试系统, 并且讨论了高温下由于探针膨胀造成的测试误差修正问题。1996 年, Bringham S. [3] 采用终端开路同轴探针法, 研制新的适合高温情况下使用的金属化陶瓷同轴探头, 该探针由氧化铝制成, 用 3.0 mm 的钼层金属化, 镀镍层为 0.5 μm 的保护层, 在完成校准之后, 可是实现在 500 MHz~3 GHz 和室温~1000℃ 下的精确测量。2001 年, Agilent [4] 公司利用终端开路法, 推出了-40℃ 到 200℃ 的测试探头和测试软件, 采用

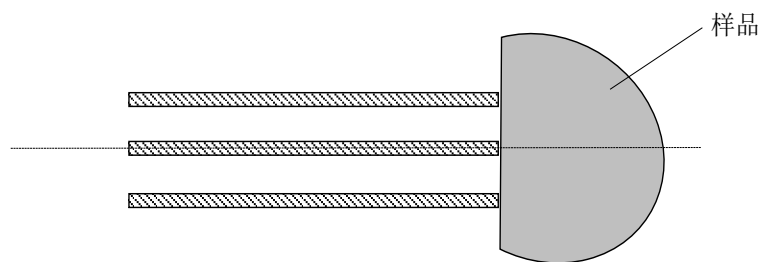


Figure 1. Coaxial open circuit reflection method
图 1. 同轴开路反射法

7 mm 的传输线进行了 0.2~20 GHz 的变温测试。2007~2008 年, Namgon Kim [5] [6] 选用同轴反射法, 优化探针选择, 最大限度的增大了带宽, 减小测量不确定度, 实现了对液体材料进行的变温测试, 频率范围为 0.5~40 GHz, 温度范围为 -30°C ~ 100°C 的测试。2015 年, 孙珊珊[7]利用双同轴法对于搭建了高温情况下的复介电常数以及测量方法, 由于传统的单同轴测量方法容易出现多值性的问题, 因此使用简单可行的双同轴试验方法, 使用较大的开口腔体便于材料填充, 提高双同轴结构使用度, 最终测得 2~2.8 GHz 下, 室温~ 500°C 的情况下材料的复介电常数。

2.1.2. 短路反射法

见图 2 所示, 是短路反射法的测量结构。在实际测试的过程中, 通常会将待测样品设置为短路状态。1990 年, 美国 ASTM [8] 利用终端短路法建立了温度范围为室温~ 1650°C 的测试标准, 测试频率为 0.5~50 GHz。1991 年, Paul Friederichp [9] 进行了关于终端短路法的研究, 并且建立了一套最高温度为 2000°C 的测试系统, 频率范围为 7.5~40 GHz, 该文献将测试夹具放在真空箱中, 用石墨电极进行加热。2008 年电子科技大学郭高凤[10]、王益[11]在终端短路的基础上, 改进矩形波导形式, 采用对比测试模型, 通过测试不同温度频段下样品散射参数的测量, 最终实现 X 波段点频测试, 温度范围室温~ 2200°C 的介电常数测试。2009 年, G. A. Dimitrakis [12] 设计了一种可以用于测试液体复介电常数的测试系统, 创新性在于可以在高压和高温下对液体进行直接追踪测试, 测试系统由圆柱形金属短路腔体组成, 用以容纳液体。此种方法已经被用于进行超临界液体的测试, 测试温度室温~ 273°C , 测试频段 9 MHz~2.5 GHz。

2.1.3. 自由空间法

自由空间法见图 3 所述, 是一种非接触和非破坏性的测试方法, 利用天线将电磁波辐射到自由空间, 再利用天线接收并测试材料对所发射电磁波的反射和透射信号, 从而计算出材料的电磁参数。与其他测试方法相比, 自由空间法对测试样品没有非常严格的形状和工艺要求, 只需厚度均匀且有一定大的测试面积, 以避免边缘绕射[13]。

1991 年, Varadan V. V. [14] 发表了利用自由空间法进行周边环境温度到 850°C 的复介电常数的测试, 测试频段 5.85~40 GHz, 测试时, 将待测样品放置于高温炉中, 一对点聚焦天线用于发射和接收通过待测样品的电磁波, 并且采用了分别对 S21 和 S11 进行测试的方法, 结果发现, 对于损耗不同的材料, 其得到的测试准确度不一致。Anita Macdonald [15] 使用自由空间法, 将待测样品放置在圆柱形熔炉内, 使用喇叭天线作为接受和发射装置, 实现了更高频率 (30~100 GHz) 和更高温度条件 (0°C ~ 1500°C) 的电磁参数测量。2011 年, 李元奇[16]创新性的设计 7 字形弓形架代替传统弓形架, 采用平板型加热电阻丝, 结合矢量网络分析仪, 完成了频率范围内 2~40 GHz, 室温~ 800°C 的高温测试。2017 年, 王宝杰[17]设计了适用于低频情况下的超高温新型双椭球开放腔测试系统, 完成了高温情况下介电常数的测试, 但是目前处于仿真阶段, 所计算的测试精度为 1.6%, 实物阶段仍在继续。

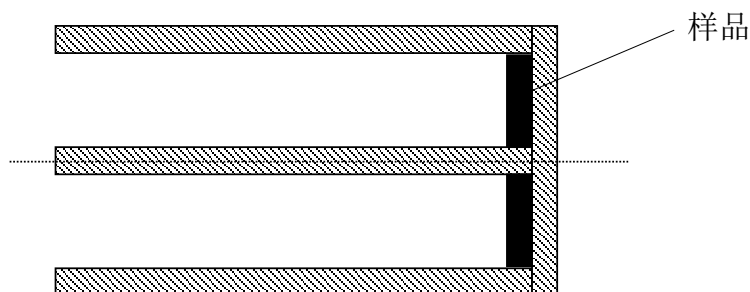


Figure 2. Coaxial short circuit reflection method
图 2. 同轴短路反射法

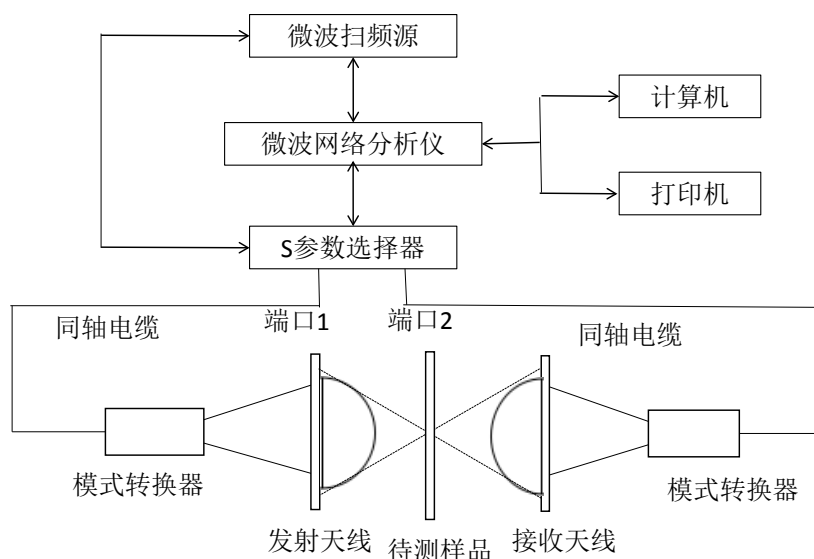


Figure 3. Free space test system diagram
图 3. 自由空间测试系统图

2.2. 传输反射法

传输反射法的原理[18][19]是将待测样品置于一段传输线中,见图4所示,例如波导或者同轴线,通过相关的散射方程将含有待测样品的传输显得散射参数与样品的介电常数和磁导率产生联系,进而得到样品的电磁性能。在传输反射过程中,所有的四个散射参数都可以通过测量得到,因此这种情况可以得到更多的测试数据。

1996年, Thorsten Hauschild [20]研究了基于传输反射法的特殊波导在高温情况的校准技术~TRL,并且采用精确选材的波导腔材质,最终可以实现 X 波段,测试温度范围室温~1000℃的复介电常数测试系统,该测试适用于粉末和液体。2000年,英国 A. P. Gregory [21]利 TRL 校准方式和同轴线作为传输线的方法,实现了温度范围 5℃~50℃,频段范围 100 MHz~5 GHz 的介电常数测试。2003年,电子科技大学李恩依据传输反射法,制作矩形波导实现了 8.2~12.4 GHz 范围内,室温~200℃内的吸波材料电磁参量测试技术,并且很好的进行了在高温测试过程中的 TRL 校准和误差分析。同年, Nassar [22]等设计了一种手持式超宽频的钻孔探针天线,用于复介电常数的原位测量。将探针安装在铜圆柱体重的两个短天线中,测量时将探针插入待测材料中,通过探针天线数值模拟得到的预测信号和实际信号进行对比,即可以得到实际的介电常数。

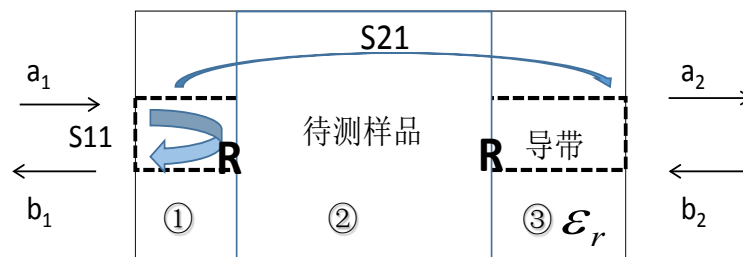


Figure 4. The Principle Schematic two-port transmission line method

图 4. 双端口传输线法示意图

3. 谐振法

谐振法是将样品作为谐振结构的一部分来测量介电常数的方法，可以分别分为微扰法、准光腔谐振腔法、介质谐振腔法、带状线谐振腔法等。

3.1. 谐振腔微扰法

在谐振腔微扰法中，将样品插入谐振器中，样品的性能由样品引起的谐振频率以及谐振器的品质因数的变化计算得到。即待测样品被引入一个谐振器中，样品的电磁特性可以从谐振频率以及谐振器品质因数的变化中推导出来。1963年，I. Bady [23]最早使用谐振腔微扰法进行测试，建立了一套 X 波段、室温-250℃的测试系统。1989年，Hutcheon R. M. [24]利用 TM_{0n0} 圆柱型谐振腔进行室温-1000℃的复介电常数的测试，研制了两套变温测试系统，这两种测试系统运用一腔多模技术可以完成对杆状样品，在 50 MHz~600 MHz 范围和 400 MHz~3 GHz 的宽频带下的测试技术。1995年 Binshen Meng [25]利用改进的圆柱谐振腔微扰法在 2 GHz~20 GHz 的范围内对样品进行了变温测试，该方法采取加热温度是用紧贴在腔体上下表面的电阻换对腔体进行加热，温度范围 20℃~1000℃。1996年，Shane M. Bringham [26]运用集总电容和环形天线衍射两种模式，结合同轴谐振腔微扰法，通过改进金属氧化铝陶瓷探头，最终实现频段范围 500 MHz~3 GHz，温度范围室温-800 摄氏度的介电常数测试，最后进行误差分析和新的 FDTD 知识实现对薄膜样品的测试。

2007年，曹茂盛[27]采用谐振腔技术测量了低损耗介质材料的介电常数和损耗角正切，在利用谐振腔的技术下，精确的测量了 9~10 GHz 材料的介电性能，温度范围为室温-800℃，同时创造性的通过误差分析和实验标定，解决了关于高温测量过程中的热膨胀效应引起的误差。2010年 Antoni J. Canos [28]发表了圆柱谐振腔 TM₀₁₀ 模微扰法对材料进行变温测试，是一种快速测定高温介质介电特性的方法，采用直接用微波对样品进行加热的方式进行，同时也实现同时测量，通过放大器增加矢量网络分析仪的源信号，加热温度 450℃，并用红外温度计进行测温，但是在该篇文章中没有给出测量的频率范围。2015年，José M. Catalá-Civera [29]研制了一种微波腔体和加热系统，可以动态测量介电材料在室温-1000℃的复介电常数，该方法是基于双模式圆柱型腔，其中由两个不同的扫频微波源进行加热和测试。用改进的谐振腔微扰法计算了材料在加热过程中的介电特性，并且得到测试误差小于 5%。

3.2. 准光学谐振腔法

准光学谐振腔法是由不同曲率半径的凹球面镜构成，属于开放式谐振腔，是光学谐振结构在微波、毫米波频段的延伸，谐振频率较高，主要适用于毫米波频段的介质参数的测试。

2006年，冯丽萍，韦高[30]等采用球面/平面型准光腔进行了 Ka 波段复介电常数的点频变温测试，用特制的碳硅管对平面镜进行加热，加热温度可达 1000℃以上，文中给出了最高达 600℃的测试结果。

由于准光腔是开放式结构,用该方法加热时,样品上下表面温度差别较大,热电偶测试的平面镜温度无法反映样品的真实温度。2012年,聂瑞星[31]采用半对称准光腔的结构作为测试夹具,选取适合宽频20~40 GHz的谐振腔尺寸,结合腔长和扫频测试的优点,运用谐振腔的 TEM_{00q} 模式,同时改进同轴耦合环的耦合方式,通过调节耦合环的伸入长度来控制耦合量的大小,选用感应加热的方式实现室温~1000℃的测试范围。

3.3. 介质谐振腔

介质谐振腔法被广泛的应用于低损耗介电常数的测试描述,一般包括球形介质谐振器、圆柱形谐振器、环形谐振器以及矩形谐振器等。对于材料介电性能表征,需要研究介电材料的结构,并设计金属屏蔽结构,对于不同的介质谐振器方法,有不同结构的金属屏蔽结构和介质样品,并采用不同的算法对材料的性能进行计算。主要是将高介电、低损耗的待测样品制备成一圆柱形微波谐振器,根据相应谐振模式的谐振频率、品质因数计算出对应的复介电常数。2004年,黎义[32],李建保等根据 H_{01n} 模可加热圆柱谐振腔磁场分量以及电场分量的特性,利用谐振腔中活塞的滑动接触不损害谐振器的质量因素的谐振腔法,实现了对于介电常数不大于200和介电损耗正切不大于0.05的固体电介质在室温~1200℃以及9~10 GHz频率范围内的磁导率值的测量,并对影响电介质高温介电性能测试精度的设备因素、计算方法和实验结果的应用等进行了分析和讨论。2002年,Geyer RG [33]利用套管谐振器对介质材料进行室温~150℃的变温测试,该方法中套管的损耗和金属表面电阻对介质损耗测试有影响,文章中认为当被测样品为高介电常数材料,此时其电磁能量主要集中于被测样品时,同时确定了整个测试过程中的不确定度,主要来源于套管损耗和无载品质因数的不确定度作为测试误差考虑的另一面,该文章中指出,可以利用高次模式在其他频率进行测量。

3.4. 传输线谐振腔

传输线谐振器法是将待测样品作为微带线、带状线等传输线的介质基片,做成微波传输线谐振器,见图5所述,根据谐振器的谐振频率和品质因数即可以计算出材料的复介电常数。传输线谐振法适合于测试薄的电路介质基片材料。

2004年,J.-M. Heinola [34]将待测样品做成环形微带线谐振器的基片,该方法是基于微带环形谐振器和气氛保护装置,该方法可以测试在1 GHz~10 GHz, -30℃~105℃环境下的不同层状材料的频率特性。

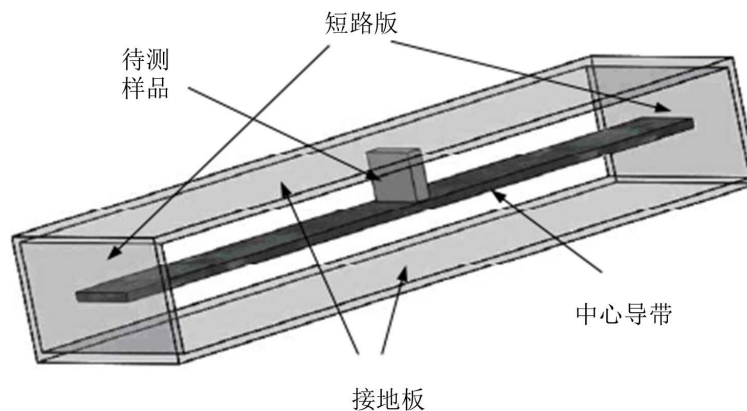


Figure 5. A schematic diagram of electromagnetic parameters testing in a ribbon line resonator

图 5. 带状线谐振腔电磁参数测试示意图

Table 1. Summary of different measurement methods**表 1.** 不同方法优缺点表示

方法类型	短路反射法	开路反射法	自由空间法	传输/反射法	谐振腔
频率范围	0.1~40 GHz	0.1~40 GHz	频带更宽	00.1~40 GHz	多频点
测量范围	中、高损耗	中、高损耗	中、高损耗	中、高损耗	低损耗
计算难度	低	高	中	中	易
样品制备	较难	容易	容易	较难	较难
测量精度	中等	低	中等	中等	高
特点	工作量大 精度低 样品形状多样	无损测试 通用性强	非接触性 非破坏性	有损测量 样品形状多样	有损测试 造价高 设计复杂

国内, 2007~2011 年, 电子科技大学李恩、郭高凤[35]、周扬[36]等采用带状线谐振器方法, 进行不断改进测试, 通过建立变温测试非等横截面腔体的物理模型, 推导出带状线谐振腔材料复介电性能变温测试理论, 最终组件了一套测试频率为 0.5~18 GHz, 温度范围室温~1500℃的测试装置。

3.5. 其他谐振腔法

高 Q 腔法采用圆柱形腔的 TE_{01n} 模, 向腔体内置入圆盘形介质样品, 有两种测试方法。一种是通过测试在放置样品之前与放置样品之后, 固定谐振频率情况下腔体长度变化或者固定腔体尺寸来观测谐振频率的变化, 以此来完成复电磁参数的测试。美国 NIST 建立了利用高 Q 谐振腔法进行复介电常数的测试标准。该测试方法电场极化方向是在测试样品平面上[37]。另外一种固定腔体的谐振频率, 通过测量加载样品前后腔体长度和品质因数的变化计算复介电常数[38]。

2001 年, Roussy G 采用多模螺旋传输线谐振腔对[39]材料复介电常数宽带变温测试的方法进行了研究, 频率从 2~9 GHz, 温度高达 800℃, 测量过程中, 先将待测样品先放入石英管中加热, 到达测试温度点后快速放入螺旋线谐振腔中测量。被测样品体积小于 1 cm^3 。待测样品形式多样化, 即可以是固体、液体也可以粉状样品。该方法采用六个标准液体样品的测试对公式进行了修正。

3.6. 测量方法总结

对于不同测量方法之间优缺点见表 1。

4. 结论

电磁参数的变温测量技术已经广泛的应用于各个方面, 就几种测试模型来说, 几种主要的测量方法各有利弊。传输反射法的覆盖频率覆盖范围较宽, 适用于介电常数较大的材料, 但是其对大多数的薄膜材料不太合适; 谐振腔法只能在有限频点下进行测试, 测量精度高。自由空间法是无损测试, 测试频带较宽, 但是准确性相对较差, 同时对于高温系统下的自由空间法测量低频情况时需要较大的测量面积, 加热困难。对于不同的材料一起测试要求测试频率有不同的适用方法, 在不同的工程要求和实验环境中要有具体的测试方法, 根据测试方法选取不同的测试方法。

参考文献

- [1] Arai, M., Binner, J.G.P. and Cross, T.E. (1993) High Temperature Dielectric Property Measurements of Engineering Ceramics. *Ceramic Transactions*, **36**, 483-492.
- [2] Arai, M., Binner, J.G.P. and Cross, T.E. (1995) Correction of Errors Owing to Thermal Elongation of High Tempera-

- ture Coaxial Probe for Microwave Permittivity Measurement. *Electronics Letters*, **31**, 1138-1139. <https://doi.org/10.1049/el:19950780>
- [3] Bringham, S. and Iskander, M.F. (1996) Open-Ended Metallized Ceramic Coaxial Probe For High-Temperature Dielectric Properties Measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, **44**, 926-935. <https://doi.org/10.1109/22.506453>
- [4] Agilent (2001) Agilent 85070D Dielectric Probe Kit. Agilent Product Note No. 5986-5330E.
- [5] Kim, N., Yoon, J., Kim, D., *et al.* (2007) A High-Temperature Capable Planar-Type Coaxial Probe for Complex Permittivity Measurements Up to 40 GHz. Microwave Symposium. *IEEE/MTT-S International*, IEEE, 2007, 519-522.
- [6] Kim, N., Yoon, J., Cho, S., *et al.* (2008) An Optimum Design Methodology for Planar-Type Coaxial Probes Applicable to Broad Temperature Permittivity Measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, **56**, 684-692. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2008.916986>
- [7] 孙珊珊, 黄卡玛. 双同轴高温垃圾复介电常数测量装置与方法[J]. 微波学报, 2015, 31(4): 89-92.
- [8] Standard Test Methods for Complex Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials at Microwave Frequencies and Temperatures to 1650 degree C. 1990.
- [9] Friederich, P., Moore, R.L. and Larsen, J.W. (1991) Elevated Temperature Measurements of Permittivity and Permeability at Temperatures above 1000 Degrees C. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1991. AP-S. Digest. IEEE, Vol. 3, 1672-1675.
- [10] 郭高凤. 高温介质材料介电性能终端短路法测试系统研究[D]. 电子科技大学, 2008.
- [11] 王依超. 材料复介电常数超高温测试技术研究[D]. 电子科技大学, 2015.
- [12] Dimitrakis, G.A., George, M., Poliakoff, M., *et al.* (2009) A System for Traceable Measurement of the Microwave Complex Permittivity of Liquids at High Pressures and Temperatures. *Measurement Science & Technology*, **20**, 91-91. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/4/045901>
- [13] 唐宗熙, 张彪. 用自由空间法测试介质电磁参数[J]. 电子学报, 2006, 34(1): 189-192.
- [14] Varadan, V.V., Hollinger, R.D., Ghodgaonkar, D.K., *et al.* (1991) Free-Space, Broadband Measurements of High-Temperature, Complex Dielectric Properties at Microwave Frequencies. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, **40**, 842-846. <https://doi.org/10.1109/19.106308>
- [15] Macdonald, A., Friederich, P. and Moore, R.L. (1991) Millimeter Wave Dielectric Measurements at Elevated Temperatures. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1991. AP-S. Digest. IEEE, Vol. 3, 1668-1671.
- [16] 李元奇. 弓形法对吸波材料反射率的变温测试研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [17] 王宝杰, 都文斌. 新型椭球腔用于低损材料相对介电常数超高温测量的研究[J]. 微波学报, 2017, 33(8): 310-313.
- [18] Bakerjarvis, J., Janezic, M.D., Grosvenor, J.H.J., *et al.* (1993) Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability. Nasa Sti/recon Technical Report N, 93.
- [19] Baker-Jarvis, J., Vanzura, E.J. and Kissick, W.A. (1990) Improved Technique for Determining Complex Permittivity with the Transmission/Reflection Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **38**, 1096-1103. <https://doi.org/10.1109/22.57336>
- [20] Hauschild, T. and Knochel, R. (1996) Measurement of Complex Permittivity of Solids up to 1000. *Journal Title*, **3**, 1687-1690.
- [21] Gregory, A.P., Etzel, S. and Clarke, R.N. (2000) Precise Measurements on Dielectric Reference Liquids over the Temperature Range 5-50/spl deg/C Using Coaxial Line Methods. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, Sydney, 14-19 May 2000, 455-456.
- [22] Nassar, E.M., Lee, R. and Young, J.D. (1999) A Probe Antenna for *in Situ* Measurement of the Complex Dielectric Constant of Materials. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, **47**, 1085-1093. <https://doi.org/10.1109/8.777136>
- [23] Bady, I. and Collins, T. (1963) Dielectric Constant Ferrites and Loss Tangent of Microwave at Elevated Temperatures. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, **11**, 222-226. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1963.1125646>
- [24] Hutcheon, R.M., De Jong, M.S., *et al.* (1989) A Technique for Rapid Scoping Measurement of RF Properties up to 1000 °C. *Electromagnetic Energy Reviews*, **2**, 46-50.
- [25] Meng, B., Booske, J. and Cooper, R. (1995) A System to Measure Complex Permittivity of Low Loss Ceramics at Microwave Frequencies and over Large Temperature Ranges. *Review of Scientific Instruments*, **66**, 1068-1071. <https://doi.org/10.1063/1.1146518>
- [26] Bringham, S.M. Nondestructive High Temperature Broadband Dielectric Properties Measurements—Analysis and Measurements.

- [27] Cao, M., Hou, Z., Shi, X., *et al.* (2007) A Research on High-Temperature Permittivity and Loss Tangent of Low-Loss Dielectric by Resonant-Cavity Technique. *High Technology Letters*, **13**, 279-282.
- [28] Canos, A.J., Penaranda-Foix, F.L., Catala-Civera, J.M., *et al.* (2010) Measurement of Dielectric Properties at High-Temperatures in Real-Time with Cylindrical Cavity. *Microwave Symposium Digest*, Anaheim, 23-28 May 2010, 29.
- [29] Catala-Civera, J.M., Canos, A.J., Plaza-Gonzalez, P., *et al.* (2015) Dynamic Measurement of Dielectric Properties of Materials at High Temperature During Microwave Heating in a Dual Mode Cylindrical Cavity. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, **63**, 2905-2914. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2453263>
- [30] 冯萍丽, 韦高. Ku 波段开腔电介质高温自动测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1323-1326.
- [31] 聂瑞星. 准光学谐振腔法复介电常数变温测试系统研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [32] 黎义, 李建保, 何小瓦. 采用谐振腔法研究透波材料的高温介电性能[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(2): 157-160.
- [33] Geyer, R.G., Kabos, P. and Baker-Jarvis, J. (2002) Dielectric Sleeve Resonator Techniques for Microwave Complex Permittivity Evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, **51**, 383-392. <https://doi.org/10.1109/19.997841>
- [34] Heinola, J.M., Latti, K.P., Silventoinen, P., *et al.* (2004) A New Method to Measure Dielectric Constant and Dissipation Factor of Printed Circuit Board Laminate Material in Function of Temperature and Frequency. *International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces*, Atlanta, 24-26 March 2004, 235-240.
- [35] Guo, G. and Li, E. (2007) Stripline Resonator Method to Measure Complex Permittivity of Dielectric of Dielectric Substrate as a Function of Temperature. *7th International Symposium on Test and Measurement*, Vol. 2, 1908-1910.
- [36] 周杨. 带状线法透波材料高温介电性能测试技术研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [37] Baker-Jarvis, J., Janezic, M., Riddle, B., *et al.* (2001) Dielectric and Conductor-Loss Characterization and Measurements on Electronic Packaging Materials. NIST Technical Note 1, 520.
- [38] 中华人民共和国国家技术监督局. GB5597.1999. 固体电介质微波复介电常数测试方法[P]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [39] Roussy, G., Thiebaut, J.M., Ennameobiang, F., *et al.* (2001) Microwave Broadband Permittivity Measurement with a Multimode Helical Resonator for Studying Catalysts. *Measurement Science & Technology*, **12**, 542. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/4/321>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-6122, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: japc@hanspub.org