

文章编号: 2095-4980(2024)01-0062-06

平板介质的微波分裂腔法介电常数测试技术

王 益, 张翠翠, 于明媚, 王建忠*

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为实现微波频段平板类介质材料的介电常数的无损测试, 研究了分裂式圆柱形谐振腔测试方法。介绍了分裂式圆柱形谐振腔的电磁场分析理论, 采用模式匹配技术实现了介质加载条件下腔内电磁场分布的精确求解, 得到了腔体谐振频率与材料介电常数之间的准确关系。在理论分析的基础上, 制作了空腔谐振频率为 10 GHz 的分裂式谐振腔, 并与前期研制的闭式谐振腔进行对比测试, 介电常数实部测量结果相对误差小于 1%。与国外同类产品进行对比测试, 介电常数实部结果基本一致, 损耗角正切测量结果更接近于文献参考值。因此, 微波分裂腔法能够实现平板介质板材的无损测量, 具有准确度高, 使用方便等突出优势, 可在微波频段内实现介电常数为 1~20, 损耗角正切为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$, 板材厚度为 0.1~2.0 mm 的各类平板介质材料介电常数的准确测试。

关键词: 分裂式谐振腔; 介电常数测量; 平板介质材料; 损耗角正切

中图分类号: TM93; TH873

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021395

Permittivity measurement technology of flat dielectrics using microwave split-cavity method

WANG Yi, ZHANG Cuicui, YU Mingmei, WANG Jianzhong*

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The test method of split cylindrical resonator is studied in order to realize the nondestructive test of dielectric constant of flat dielectric materials in microwave band. The electromagnetic field analysis theory of split cylindrical resonator is introduced, and the accurate solution of electromagnetic field distribution in the cavity under dielectric loading is realized by using mode matching technology. The exact relationship between the resonant frequency of the cavity and the dielectric constant of the material is obtained. On the basis of theoretical analysis, a split resonator with cavity resonant frequency of 10 GHz is fabricated and compared with the previously developed closed resonator. The relative error of the measurement results of the real part of dielectric constant is less than 1%. Compared with similar foreign products, the real results of dielectric constant are basically consistent, and the measurement result of loss tangent of this device is closer to the reference value. Therefore, the microwave split cavity method can realize the nondestructive measurement of flat dielectric plates, with outstanding advantages such as high accuracy and convenient use. It can accurately test the dielectric constants of various flat dielectric materials with dielectric constant range of 1~20, tangent of loss angle $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ and plate thickness of 0.1~2.0 mm in the microwave frequency band.

Keywords: split-cylinder cavity; permittivity measurement; flat dielectric material; tangent of loss angle

微波介质材料在航空航天、军事装备、电子通信等领域中的应用非常广泛。介电常数是介质材料最重要的电学参数, 其实部决定了介质材料对微波的反射特性, 虚部决定了介质材料对微波的吸收特性。国内外微波介

收稿日期: 2021-11-07; 修回日期: 2022-01-26

*通信作者: 王建忠 email:WJLZ1999@sina.com

质材料厂商一般只提供介电特性参数的典型值, 不提供各介电特性参数的频率特性, 这给器件仿真设计等工作带来较大困难, 使仿真设计结果与实际结果存在较大差异。特别是在微波电路设计过程中, 绝大多数采用基于印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)介质基板等平板介质材料的微带电路等电路形式, 相应平板介质材料介电常数是电路设计过程中不可或缺的重要参数, 决定了各类电路功能模块的设计指标与实物样机测量结果的吻合程度, 因此开展平板介质材料介电常数测试具有重要应用价值。

介电常数测量方法众多^[1], 根据其量程范围、频率范围等采用不同的测量方法和测量系统, 大致可分为传输线法^[2-6]和谐振腔法两种^[7-11]。谐振腔法涉及到复杂边界条件下电磁场问题的求解, 计算较为复杂, 但测量准确度高, 受到英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)、美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)等权威计量机构的重视, 其提供的标准物质的校准值基本采用谐振腔法测量得到。前期调研显示, Rogers、Arlon等国际知名的电路板材料生产厂商, 均针对自身材料的测试需求进行了相应测试系统的开发, 比较通用的测试方法是采用印刷电路学会(Institute of Printed Circuits, IPC)制定的TM650 2.5.5.x系列方法^[12-13], 其中分裂式谐振腔法是最重要的方法之一, 该方法由NIST提供。目前商用仪器较少, 测量频率局限于10 GHz单一频率点的测试, 无法满足国内微波介质基材的研发、电路设计等各类实际应用情况下多频点的测试需求。而国内目前基本上采用带状线法^[14]进行介电常数的测量, 该方法对微带电路板的尺寸有一定要求, 部分还需要进行电路印制, 无法实现无损测量。

因此, 本文详细介绍了一种基于分裂式圆柱形谐振腔的介电常数测试方法, 用于实现平板类低损耗介质材料的介电常数的测量, 并具有使用方便, 测试样品制作简单, 测试准确度高的优点。

1 方法和原理

1.1 测量模型

谐振腔法测量的基本原理为: 将样品置于一个封闭或开放式谐振腔内, 在外加激励下形成特定的电磁场分布; 关注样品材料放置前后对腔体电磁场分布的影响, 利用矢量网络分析仪测出腔体的品质因数和谐振频率的变化; 根据品质因数、谐振频率与电磁参数的关系, 推导出材料的电磁参数。此方法常用于低损耗介质材料电磁参数的测量。

微波分裂式谐振腔法介电常数测量模型如图1所示, 分裂式谐振腔由一个圆柱形金属腔从中心位置沿径向分为上下两部分腔体。将被测介质材料水平放置于上下谐振腔之间的缝隙中, 利用2根耦合探针对腔体内部的电磁场进行耦合, 外接具有扫频测量功能的矢量网络分析仪测量谐振腔的微波散射参数, 根据测得的谐振频率与相应品质因数 Q 值, 计算腔体内电磁场分布、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。

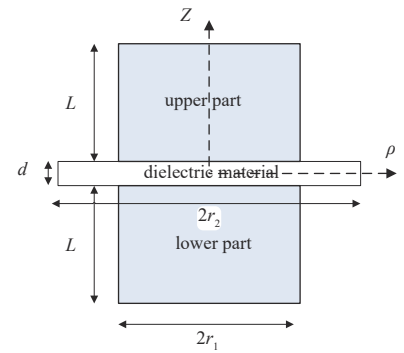


Fig.1 Measurement model of split resonator method
图1 分裂式谐振腔法测量模型

1.2 谐振条件

由于测量模型为对称分布, 下半部分电场分布与上半部分相同。根据腔体内空气区域 a 与介质区域 b 的电场连续性条件推导出谐振条件, 在 $d/2$ 的分界面处, 电场连续可得到:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\phi a}(z=d/2) = \mathbf{E}_{\phi b}(z=d/2), & 0 \leq \rho \leq r_2 \\ \mathbf{H}_{\rho a}(z=d/2) = \mathbf{H}_{\rho b}(z=d/2), & 0 \leq \rho \leq r_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_{\phi a}$ 为空气区域电场; $\mathbf{E}_{\phi b}$ 为介质区域电场; $\mathbf{H}_{\rho a}$ 为空气区域磁场; $\mathbf{H}_{\rho b}$ 为介质区域磁场; d 为介质材料厚度。根据边界条件, 采用模式匹配法, 通过计算可得到介电常数与 $\text{TE}_{01\delta}$ 模式下的谐振频率之间的准确关系:

$$\det[\mathbf{M}] = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_M & \mathbf{E} \\ \mathbf{S} & \mathbf{I}_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{I}_M$ 、 $\mathbf{I}_N$ 为单位矩阵; $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{S}$ 矩阵元素为:

$$E_{mn} = \frac{p_{na}}{p_{ma}} \times \frac{2h_{ma}}{r_1(h_{na}^2 - h_{ma}^2)} \times \frac{J_1(h_{na}r_1)}{J_0(h_{ma}r_1)} \times \frac{\sin(p_{na}d/2)}{\cos(p_{ma}L)} \quad (4)$$

$$S_{nm} = \frac{2r_1 h_{ma}}{r_2^2 (h_{na}^2 - h_{ma}^2 r_1)} \times \frac{J_0(h_{ma} r_1) J_1(h_{na} r_1)}{J_0^2(h_{na} r_2)} \times \frac{\sin(p_{ma} L)}{\cos(p_{na} d/2)} \quad (5)$$

$$p_{na}^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_{ra} - h_{na}^2 \quad (6)$$

$$h_{na}^2 = j_{1,n}/r_1 \quad (7)$$

$$p_{ma}^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r - h_{ma}^2 \quad (8)$$

$$h_{ma}^2 = j_{1,m}/r_2 \quad (9)$$

式中: $m \leq M$ 、 $n \leq N$, M 和 N 分别为所取的基函数数目, 理论上, M 和 N 取值越大, 计算结果越准确, 但会增加运算量; L 为谐振腔半腔高度; J 为贝塞尔函数; ω 为角频率; μ_0 为真空磁导率; ε_0 为真空介电常数; ε_{ra} 为空气的相对介电常数; $j_{1,m}$ 、 $j_{1,n}$ 为贝塞尔函数的第 m 、 n 个根。

式(2)给出了分裂式谐振腔内电磁场分布的线性方程组, 方程内仅包含与谐振频率相关的角频率 ω 和相对介电常数 ε_r 这 2 个未知参数, 通过测试得到腔体谐振频率之后, 可根据线性方程组具有非零解的条件求出相应介电常数。

1.3 损耗

材料的损耗角正切 $\tan \delta$ 与腔体之间的无载品质因数的关系可表示为:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_t} + \frac{1}{Q_c} \quad (10)$$

式中: Q_u 为腔体的无载品质因素; Q_t 和 Q_c 分别为介质损耗和腔体内表面电流损耗:

$$Q_t = \frac{W_a + W_b}{W_b \tan \delta} \quad (11)$$

$$Q_c = \omega \times \frac{W_a + W_b}{P_c} \quad (12)$$

式中 W_a 、 W_b 分别为各区域的电场能量:

$$W_a = \int_0^a \int_0^{2\pi} \int_{d/2}^{L+d/2} |\mathbf{E}_{\phi a}|^2 r dr d\theta dz \quad (13)$$

$$W_b = \int_0^b \int_0^{2\pi} \int_0^{d/2} |\mathbf{E}_{\phi b}|^2 r dr d\theta dz \quad (14)$$

$$P_c = \frac{R_s}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^a |\mathbf{H}_{\rho a}|_{z=L+d/2}^2 d\phi d\rho + \frac{R_s}{2} \int_0^{2\pi} \int_a^b |\mathbf{H}_{\rho b}|_{z=d/2}^2 d\phi d\rho + \frac{R_s}{2} \int_0^{2\pi} \int_{L+d/2}^{L+t+d/2} |\mathbf{H}_{za}|_{\rho=a}^2 d\phi dz \quad (15)$$

式中: P_c 为金属腔内表面的电流损耗功率; R_s 为表面电阻。

1.4 电磁场分布仿真分析

分裂式谐振腔的结构适用于 $TE_{01\delta}$ 模式的测试, 由于上下腔体之间存在缝隙, 因此电磁场不是完全被束缚在腔体内, 若忽略缝隙中的电磁场, 将引入系统误差, 通过求解式(2)中矩阵 $\mathbf{M}$ 可得到典型的腔内电磁场分布。图 2 为采用 Matlab 求解矩阵 $\mathbf{M}$ 后绘制的电磁场分布, 图 3 为商用高频结构仿真器(High Frequency Structure Simulator, HFSS)电磁仿真软件得到的电磁场分布, 可见电磁场分布与 TE_{011} 模式电磁场特征一致, 且在缝隙区域存在衰减场。

根据上文理论分析, 编制了计算程序进行求解。设计分裂式谐振腔半径 $r_1=19$ mm, 腔体长度 $L=28$ mm, 介质材料厚度 $d=2$ mm。当介电常数 ε_r 分别为 1.00、5.00、10.00 时, $\det[\mathbf{M}]$ 随频率变化的情况如图 4 所示。曲线的过零点为谐振腔内 TE_{01p} 模式的谐振频率, 由图可见 $\det[\mathbf{M}]$ 具有多个过零点, 其中第 1 个过零点为 TE_{011} 模式的谐振频率。材料介电常数越大, 谐振频率越小, 与电磁场理论相符, 其他过零点为 TE_{0kp} 高次模。

过零点频率与 HFSS 仿真求解的谐振频率对比如表 1 所示。从表 1 可以看出, 谐振频率差别小于 1%。

为分析间隙区域高次模对谐振频率的影响, 计算介电常数 ε 为 5 时, 谐振频率随 r_2 增加的变化, 如表 2 所示。随着 r_2/r_1 的增大, 谐振频率迅速收敛于 8.10 左右, 当 r_2 增大至 r_1 的 1.1~2 倍之间, 谐振频率变化小于 0.06%, 说明间隙区电磁场衰减迅速; 当 $r_1=r_2$ 时, 分裂腔退化为经典圆柱腔, 此时对比可以看出间隙区高次模对谐振频率的影响约为 0.33%。

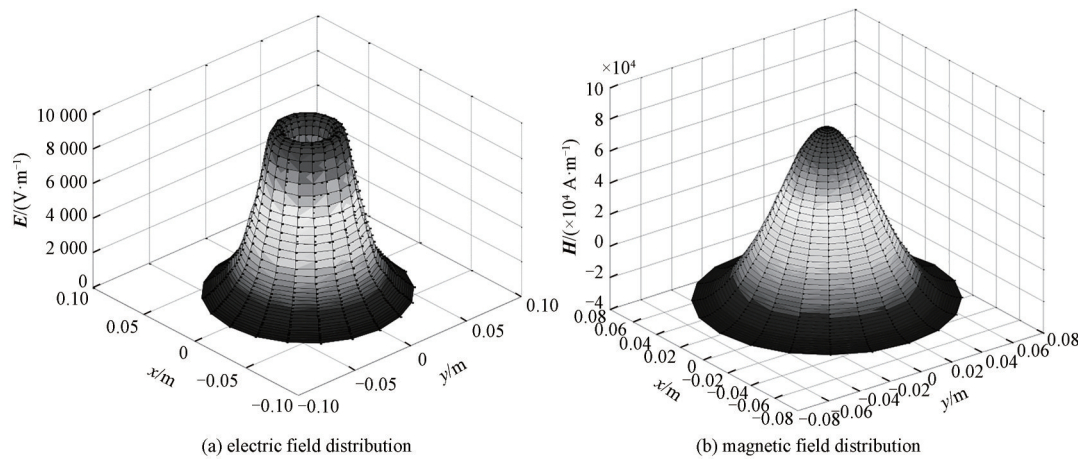


Fig.2 Electromagnetic field distribution of split resonator(matrix M solved with Matlab)
图 2 分裂式谐振腔电磁场分布(Matlab 求解矩阵 M)

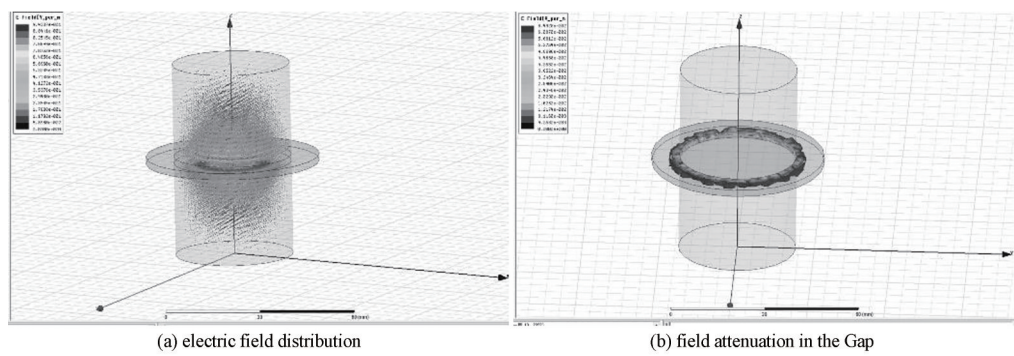


Fig.3 Electromagnetic field distribution of split resonator(HFSS simulation)
图 3 分裂式谐振腔电磁场分布(HFSS 仿真)

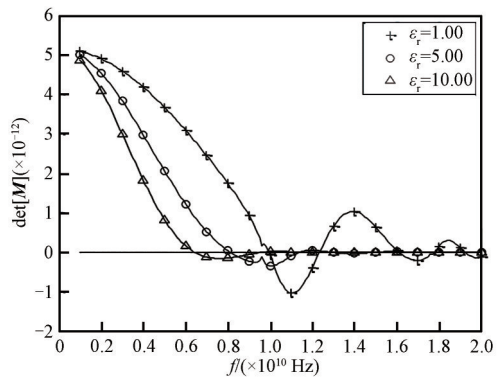


Fig.4 Variation curves of $\det[M]$ with frequency of split resonator
图 4 分裂式谐振腔 $\det[M]$ 随频率变化曲线

表 1 谐振频率对比结果

Table1 Simulated results of resonant frequency		
permittivity ε_r	resonant frequency/GHz	
	HFSS	zeros of $\det[M]$
0	9.958 4	9.949 2
5.00	8.163 3	8.106 9
10.00	6.454 6	6.435 5

表 2 谐振频率随 r_2/r_1 的变化(GHz)

Table2 Variation of resonant frequency with r_2/r_1 (GHz)	
r_2/r_1	resonant frequency
1.0	8.131 8
1.1	8.109 2
1.5	8.106 9
2.0	8.104 7

2 装置制作及验证

2.1 装置制作

谐振腔的设计主要根据抑制干扰模，并结合测量频率范围进行优化设计，具体尺寸包括谐振腔半径 r_1 、上下腔体长度 L 、待测样品厚度范围 d 等。根据测量频率范围，由空腔谐振频率计算公式得到相应腔体尺寸。以空腔谐振频率为 10 GHz 的分裂式谐振腔为例，设计优化的腔体半径 $r_1=19$ cm，腔体长度 $L=28$ cm，材料厚度测量范围 0.001~2.500 mm。设计的腔体模型如图 5 所示，外加燕尾滑轨以及数显测微头，方便进行样品厚度测量，实物图如图 6 所示。

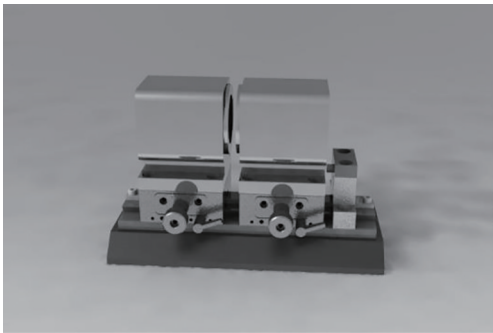


Fig.5 Design drawing of split resonator
图 5 分裂式谐振腔设计图

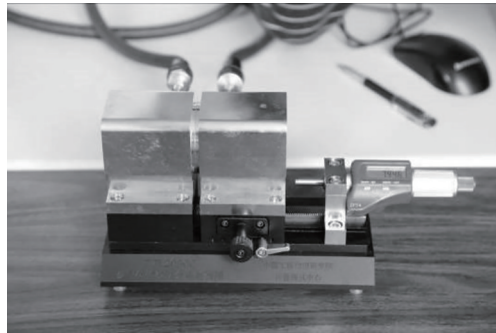


Fig.6 Physical drawing of split resonator
图 6 分裂式谐振腔实物图

2.2 对比验证

为验证分裂式谐振腔装置测量介电常数的准确性，通过两种途径进行对比测试：一种采用前期研制的闭式谐振腔^[9]进行对比，分别测量了包括空气介质在内的 6 种样品的介电常数实部 ϵ_r ，样品为圆片状，直径约 50 mm，厚度约 2.0 mm，测量结果如表 3 所示，两种方法之间计算结果的相对误差小于 1%，测量结果一致性较好，验证了该装置的准确性。

表 3 介电常数实部 ϵ_r 测试结果

Table3 Test results of the real part of permittivity(ϵ_r)

sample	ϵ_r	
	shielded resonator method	split resonator method
air	1.00	1.00
PTFE	2.04	2.04
PCB baseboard	3.36	3.33
LTCC baseboard 1	9.06	9.02
LTCC baseboard 2	10.66	10.62
LTCC baseboard 3	22.77	22.68

另一种方法采用国外的 10 GHz 分裂式谐振腔进行对比测试，分别测量 4 种样品，测量结果如表 4 所示。其中 LTCC 为 FERRO 公司的 A6M-E^[15]，本装置介电常数和损耗角与厂家技术手册吻合较好；而 Rogers 公司的 RO5880 和 RO4350B，两种装置测得的相对介电常数实部相比厂家技术手册给出的参考值都偏大；对于损耗角正切，国外装置测得数据结果偏大，本装置测得数据与厂家数据较为接近。

表 4 本装置与国外装置测试结果对比

Table4 Test results comparison between this device and a foreign device

sample	the foreign device		this device		reference	
	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$
HTCC	8.82	0.006 70	8.80	0.000 72	/	/
LTCC	5.69	0.004 90	5.71	0.000 99	5.70±0.15	< 0.001 50
RO5880	2.29	0.002 80	2.29	0.000 65	2.20	0.000 90
RO4350B	3.82	0.001 60	3.84	0.003 50	3.66	0.003 70

RO5880 和 RO4350B 相对介电常数实部偏大的主要原因之一是由于该两种材料为层压板结构，其切向方向和法向方向具有各向异性，国外装置与本装置测得结果均为切向方向介电常数，而厂家采用带状线法测得值为法向方向。

3 结论

针对高频 PCB 基板微波介电常数测量的实际需求，研制了基于微波分裂腔法的平板介质材料介电常数测量装置。通过对分裂式谐振腔电磁场分布的理论分析，结合模式匹配技术得到了腔体谐振频率与材料介电常数的准确关系；制作了空腔谐振频率为 10 GHz 的分裂式谐振腔，与前期研制的闭式谐振腔及国外 10 GHz 分裂式谐振腔分别进行了对比测试。与闭式谐振腔的对比验证结果一致性较好，相对误差小于 1%；与国外的分裂式谐振腔对比验证结果基本一致，性能接近。

微波分裂式谐振腔法具有测量结果准确，使用方便等突出优势，且能够实现平板介质板材的无损测量，可在微波频段内实现介电常数为 1~20，损耗角为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ ，板材厚度为 0.1~5.0 mm 的各类平板介质材料介电

常数的准确测试, 在介质材料设计制造、质量控制、在线检测、微波电路设计等方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 曹江. 介质材料电磁参数测量综述[J]. 宇航计测技术, 1994,13(3):30-34. (CAO Jiang. A review on measurement of electromagnetic parameters of materials[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1994,13(3):30-34.)
- [2] 骆延,樊磊,杨阳,等. 抗腐蚀共面微带结构介电常数测量方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):242-247. (LUO Yan,FAN Lei,YANG Yang,et al. Novel anti-corrosion method for permittivity measurement with coplanar microstrip structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):242-247.) doi:10.11805/TKYDA201402.0242.
- [3] 胡大海,赵锐,杜刘革,等. 太赫兹平板材料介电常数测试技术[J]. 微波学报, 2016,32(5):1-5. (HU Dahai,ZHAO Rui,DU Liuge, et al. The permeability and permittivity measurement technique of flat substrate materials at terahertz[J]. Microwave Journal, 2016,32(5):1-5.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.201605001.
- [4] HUBER O,FASETH T,MAGERL G,et al. Dielectric characterization of RF-printed circuit board materials by microstrip transmission lines and conductor-backed coplanar waveguides up to 110 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(1):237-244. doi:10.1109/TMTT.2017.2750152.
- [5] 方陈剑,陆云龙,黄季甫. 基于传输线法的微波频段海水复介电常数测量[J]. 无线通信技术, 2020,29(1):54-58,62. (FANG Chenjian, LU Yunlong, HUANG Jifu. Complex permittivity measurement of seawater in microwave frequency based on transmission line method[J]. Wireless Communication Technology, 2020,29(1):54-58,62.) doi:10.3969/j.issn.1003-8329.2020.01.011.
- [6] 周杨. 带状线法透波材料高温介电性能测试技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (ZHOU Yang. Study of high temperature complex permittivity measurement of transparent materials by stripline resonator cavity[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology, 2011.)
- [7] SÁNCHEZ J R,NOVA V,BACHILLER C,et al. Characterization of nematic liquid crystal at microwave frequencies using split-cylinder resonator method[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019,67(7):2812-2820. doi:10.1109/TMTT.2019.2916790.
- [8] 巫跃凤,杨晶晶,黄铭,等. 微波谐振腔微扰法测量材料介电常数的精度分析[J]. 材料导报, 2007(Z2):172-174,177. (WU Yuefeng,YANG Jingjing,HUANG Ming,et al. Analysis of microwave perturbation technology for measuring material permittivity[J]. Materials Reports, 2007(Z2):172-174,177.)
- [9] 王益,张翠翠,王建忠,等. 闭式谐振腔法微波介质陶瓷介电常数测量[J]. 仪器仪表学报, 2017,38(10):2500-2507. (WANG Yi, ZHANG Cuicui, WANG Jianzhong, et al. Permittivity measurement of microwave dielectric ceramics using shielded-cavity method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(10):2500-2507.) doi:10.3969/j.issn.0254-3087.2017.10.019.
- [10] 刘小明. 介电常数及其测量技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2015. (LIU Xiaoming. Dielectric and measurement techniques[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2015.)
- [11] 吴超,李恩,郭高凤,等. 高Q腔法测试透波材料毫米波复介电常数[J]. 宇航材料工艺, 2009,39(1):82-84. (WU Chao,LI En, GUO Gaofeng,et al. Millimeter wave complex permittivity measurement for low loss dielectric disks by high Q resonance cavity method[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009,39(1):82-84.) doi:10.3969/j.issn.1007-2330.2009.01.023.
- [12] IPC. Stripline test for complex relative permittivity of circuit board materials to 14 GHz[M]// IPC-TM-650 Test Methods Manual. Northbrook,IL:IPC, 1998.
- [13] IPC. Relative permittivity and loss tangent using a split-cylinder resonator[M]// IPC-TM-650 Test Methods Manual. Bannockburn,IL:IPC, 2007.
- [14] 国家技术监督局. 微波介质基片复介电常数带状线测试方法:GB/T 12636-1990[S]. 北京:中国标准出版社, 1990. (The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Strip line test method for complex permittivity of microwave dielectric substrates: GB/T 12636-1990[S]. Beijing:Standards Press of China, 1990.)
- [15] FERRO. Technical data sheet:low temperature co-fired ceramic systems A6M-E high frequency LTCC tape system[Z]. Mayfield Heights,OH:Ferro Corporation, 2015.

作者简介:

王 益(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波测试, email:laowang13579@126.com.

于明媚(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波毫米波测试.

张翠翠(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波器件测试及研制.

王建忠(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无线电、高功率微波和光学测量技术.