

## 脊波导宽频带电磁参数测试技术

李恩<sup>1</sup>, 向志军<sup>2</sup>, 郭高凤<sup>1</sup>, 张其劭<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 中国电子科技集团第二十九研究所 成都 610036)

**【摘要】**针对高损耗介质材料电磁参数的宽频带测试问题,提出了利用脊波导进行测试的新方法,建立了电磁参数测试系统,并采用TRL技术进行了系统校准。该方法仅用3个波段的脊波导即可覆盖2.0~18.0 GHz宽频带范围内的电磁参数测试,具有频带宽、体积小、测试精确度高等优点。

**关键词** 脊波导; 高损耗介质材料; 宽频带; 电磁参数; 微波测量

中图分类号 TN015

文献标识码 A

## Broadband Measurement of Electromagnetic Properties Using Double-Ridge Waveguide

LI En<sup>1</sup>, XIANG Zhi-jun<sup>2</sup>, GUO Gao-feng<sup>1</sup>, ZHANG Qi-shao<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054;

2. China Electronics Technology Group Corporation No.29 Research Institute Chengdu 610036)

**Abstract** By using double-ridge waveguide, a test method has been proposed for broadband measurement of electromagnetic properties of high-loss dielectric materials. The test system for the measurement of electromagnetic properties is built and calibrated by TRL calibration method. By using three wavebands of double-ridge waveguides, the frequency band can cover 2.0~18.0 GHz. The method features broad frequency band, small volume and high accuracy.

**Key words** double-ridge waveguide; high-loss dielectric material; broad frequency band; electromagnetic properties; microwave measurement

传输反射法被广泛地应用于高损耗介质材料电磁参数的测试技术中,其测试理论已非常成熟<sup>[1-5]</sup>。在传输反射法中,常用的传输线为同轴线或矩形波导<sup>[6-10]</sup>。对于传输线为同轴线的情形,尽管其频率测试范围较宽,所用的测试样品较小,但同轴线要求外导体和内导体同心,因而加工精度要求较高。若采用矩形波导作为传输线进行材料电磁参数的宽频带测试,所用测试样品较大,且要几个波段的波导才能覆盖。例如,需要六个波段的矩形波导才能覆盖2.0~18.0 GHz的宽频测试。而若采用脊波导作为传输线,则只需三个波段的脊波导即可完成,并且脊波导样品比矩形波导要小一些。脊波导作为传输线进行高损耗介质材料电磁参数的测试,具有频带宽、体积小等优点。

### 1 测试原理

本文中材料的电磁参数指复介电常数和复磁导率。根据Nicolson-Ross模型,材料的复介电常数和复磁导率可由被测样品的散射参数计算得来<sup>[1]</sup>。将各向同性、均匀、线性的被测样品填充到标准的传输线内,样品的厚度为 $d$ ,其物理模型如图1所示。图中样品之外传输线中的填充介质为空气,其特性阻抗为 $Z_0$ ,样品的特性阻抗为 $Z_s$ 。根据信流图理论,被测样品可看作一个互易微波双端口网络,且其散射参数为 $S$ ,其中正向传输时的两个散射参数为 $S_{11}$ 、 $S_{21}$ ,反向传输时的两个散射参数为 $S_{22}$ 、 $S_{12}$ <sup>[3]</sup>。图2所示为被测样品散射参数的信流图。

经理论分析,得出:

$$\Gamma = k \pm \sqrt{k^2 - 1} \quad (1)$$

收稿日期: 2005-06-28

作者简介: 李恩(1974-),男,硕士,副研究员,主要从事微波技术和微波测试系统方面的研究。

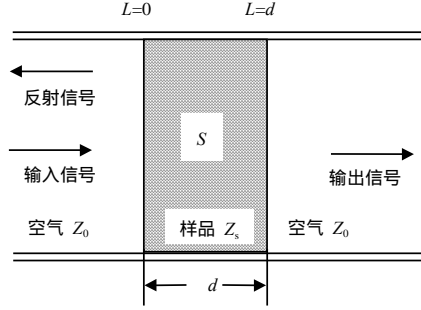


图1 传输反射法物理模型

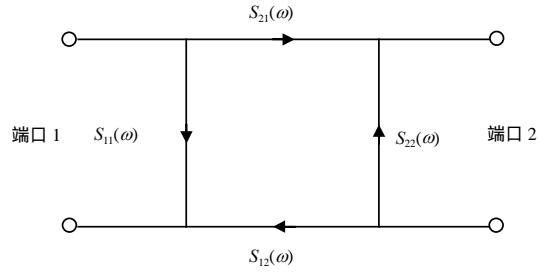


图2 散射参数信流图

$$T = \frac{[S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)] - \Gamma}{1 - [S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)] \Gamma} \quad (2)$$

$$k = \frac{[S_{11}^2(\omega) - S_{11}^2(\omega)] + 1}{2S_{11}(\omega)} \quad (3)$$

式中  $\Gamma$  是当样品的厚度为无穷大时的被测样品的复反射系数； $T$  是电磁波通过有限厚度为  $d$  的样品时的传输系数。最后，可得出：

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{A(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\left(\frac{1}{A^2} + \frac{1}{\lambda_c}\right) \lambda_0^2}{\mu_r} \quad (5)$$

$$\frac{1}{A^2} = - \left[ \frac{1}{2\pi d} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (6)$$

式中  $\lambda_c$  是所用传输线的截止波长； $\lambda_0$  是自由空间波长； $\varepsilon_r$  为被测材料的复介电常数； $\mu_r$  为复磁导率。 $\varepsilon_r$  和  $\mu_r$  的定义如下：

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad \mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (7)$$

式中  $\varepsilon_r'$ 、 $\varepsilon_r''$  分别为复介电常数的实部与虚部； $\mu_r'$ 、 $\mu_r''$  分别为复磁导率的实部与虚部。

## 2 测试系统

测试系统包括矢量网络分析仪，同轴线到脊波导的转换接头，脊波导传输线和程控计算机。测试系统框图见图3。所用矢量网络分析仪为Agilent公司的E8363A，由计算机控制矢量网络分析仪的工作状态以及取出被测样品的散射参数并进行计算，得出样品的电磁参数测试结果。系统框图中的A是同轴线到脊波导的转换接头，B为一段脊波导传输线，用来保护转换接头。被测样品置于端口1与端口2之间进行测量。

在对被测样品进行测量之前，需对测试系统进行校准，校准在端口1与端口2之间进行。因所用传输线为脊波导，系统的校准采用全二端口TRL(Thru-Reflect-Line)校准技术。其校准件包括直通、大反射负载和一段传输线<sup>[11-12]</sup>。直通为系统测试端口1与端口2直接相连，大反射负载为一个双面短路板，以减少系统连接次数。校准中所用的一段传输线校准件的长度约为所测频段中心波长的四分之一。校准件与测试系统中脊波导传输线所用的材料相同，以减小因温度引起的波导端口相接处尺寸不连续性的变化。将做好的被测样品置于测试夹具中，如图4所示。测试夹具所用的材料与校准件的材料相同，可将测试夹具与测试端口之间尺寸的不连续性减至最小，从而减小测试误差。

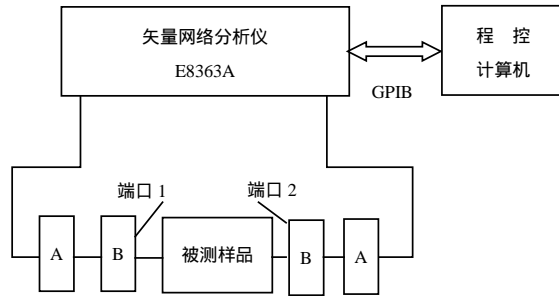


图3 测试系统框图

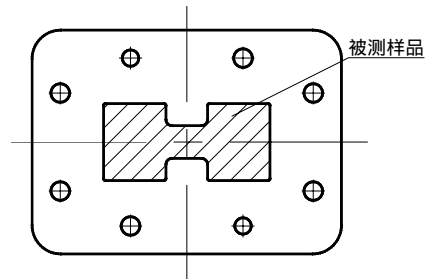


图4 置于测试夹具中的被测样品

### 3 测试结果及分析

利用上述的测试系统对高损耗材料的电磁参数进行了测试，所选用的三个脊波导波段范围分别为：WRD200：2.0~4.0 GHz；WRD350：4.0~8.0 GHz；WRD650：8.0~18.0 GHz。限于篇幅，这里仅给出利用3个脊波导对某些样品进行材料电磁参数测试的部分结果，不同频段的电磁参数的测试结果如表1~3所示。经计算分析，系统的测试范围如下： $\epsilon_r'$ 为2~80， $\text{tg} \delta_\epsilon$ 为0.1~2.0； $\mu_r'$ 为0.5~10， $\text{tg} \delta_\mu$ 为0.1~2.0。对于系统的不确定度，可根据误差原理进行分析，本文不再详述<sup>[8, 13]</sup>。经分析，系统的不确定度为：(1)  $|\Delta \epsilon_r' / \epsilon_r'|$  10%， $|\Delta \text{tg} \delta_\epsilon|$  10%  $\text{tg} \delta_\epsilon + 0.05$ ；(2)  $|\Delta \mu_r' / \mu_r'|$  10%， $|\Delta \text{tg} \delta_\mu|$  10%  $\text{tg} \delta_\mu + 0.05$ 。

表1 被测样品常温测试结果

频率/GHz	$\epsilon_r'$	$\text{tg} \delta_\epsilon$	$\mu_r'$	$\text{tg} \delta_\mu$
2.0	26.18	0.17	3.75	0.43
2.5	27.68	0.16	3.50	0.42
3.0	27.10	0.19	3.34	0.44
3.5	25.74	0.20	3.27	0.50
4.0	26.08	0.18	2.96	0.57

表2 被测样品常温测试结果

频率/GHz	$\epsilon_r'$	$\text{tg} \delta_\epsilon$	$\mu_r'$	$\text{tg} \delta_\mu$
4.0	34.10	0.20	3.05	0.54
5.0	32.01	0.22	2.76	0.64
6.0	30.74	0.23	2.51	0.73
7.0	29.59	0.22	2.26	0.83
8.0	29.08	0.19	2.02	0.96

表3 被测样品常温测试结果

频率/GHz	$\epsilon_r'$	$\text{tg} \delta_\epsilon$	$\mu_r'$	$\text{tg} \delta_\mu$	频率/GHz	$\epsilon_r'$	$\text{tg} \delta_\epsilon$	$\mu_r'$	$\text{tg} \delta_\mu$
8.0	27.18	0.13	1.73	1.02	14.0	25.68	0.20	1.06	1.24
10.0	26.62	0.15	1.43	1.13	16.0	24.44	0.20	0.99	1.34
12.0	26.28	0.16	1.20	1.22	18.0	23.72	0.23	0.98	1.40

### 4 结论

本文提出了采用脊波导作为传输线进行高损耗介质材料电磁参数的宽频带测试技术。这种技术所需采用的波导数目少，减少了测试过程中的波导连接次数，提高了测试速度。本文还建立了脊波导宽频带电磁参数测试系统，并对样品进行实际测试，得出了系统的测试范围和不确定度。这种技术同样可扩展到更高的频段进行高损耗介质材料的电磁参数测试。

### 参 考 文 献

- [1] Nicolson A M, Ross G. Measurement of intrinsic properties of materials by time domain techniques[J]. IEEE Trans. on IM, 1970, 19(4): 377-382.
- [2] Weir W B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies[J]. Proc. IEEE, 1974, 62(1): 33-36.
- [3] Hewlett Packard. Measurement dielectric constant with HP 8510B Network Analyzer[M]. Product Note 8510-3, 1985.
- [4] Jos M C, Antoni J C, Felipe L P, et al. Accurate determination of the complex permittivity of materials with transmission reflection measurements in partially filled rectangular waveguides[J]. IEEE Trans. on MTT, 2003, 51(1): 16-24.

- [5] Trevor C W, Maria A S, Paul S. Modified transmission-reflection method for measuring constitutive property of thin flexible high-loss materials[J]. IEEE MTT, 2003, 51(5): 1 560-1 566.
- [6] Gregory A P, Etzel S, Clarke R N. Precise measurements on dielectric reference liquids over the temperature range 5-50/spl deg/C using coaxial line methods[C] // Precision Electromagnetic Measurements Digest Conference, 2000: 455-456.
- [7] Baker-Jarvis J. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements[M]. NIST Technical Note 1 341, 1990.
- [8] 张其劲, 孙 稼, 曹 江. X波段微波吸波材料电磁参数扫频测量方法及系统[J]. 宇航材料工艺, 1989, (4-5): 98-103.
- [9] 卢荣润. 复介电常数与导磁率的自动扫频测量[J]. 宇航计测技术, 1991 (3): 23-28.
- [10] 曹 江. 介质材料电磁参数测量综述. 宇航计测技术, 1994, 13(3): 30-34.
- [11] 陈国强, 李 琦, 刘金亮. HP8510C非同轴系统TRL校准技术[J]. 微波学报, 1998, 14 (3): 238-243.
- [12] Kasten S K, Steer M B, Pomerleau R. Enhanced Through-Reflect-Line characterization of two-port measuring systems using free-space capacitance calculation[J]. IEEE MTT, 1990, 38(2): 215-217.
- [13] Ni E. An uncertainty analysis for the measurement of intrinsic properties of materials by combined transmission-reflection method[J]. IEEE Trans. on IM, 1992, 41(4): 495-499.

编辑 徐安玉

(上接第31页)

## 5 结 论

分析了任意倾斜的偏置磁场对静磁波激发与传播特性的影响, 得到了静磁波色散本征方程和交变磁化强度, 它们可用于定量分析微波静磁波与导波光的相互作用, 并找出最佳的倾斜偏置磁场配置以获得最大的磁光Bragg衍射效率。具体计算了YIG波导中激发的静磁体波模式、带宽、辐射阻抗和插入损耗等特性。计算表明, 适当选择倾斜偏置磁场和微波电流注入方向可有效降低静磁波插入损耗。

## 参 考 文 献

- [1] Tsai C S, Young D. Magnetostatic-forward-volume-wave-based guided-wave magneto-optic Bragg cells and applications to communications and signal processing [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech., 1990, 38(5): 560-570.
- [2] Wu Baojian, Liu Gongqiang, Zou Zhiqiang. Mode conversion and diffraction of guided optical waves from magnetostatic waves under inclined bias field [J]. Commun Theor Phys, 2001, 36(4): 497-502.
- [3] Kolokoltsev O V, Vountesmeri V. Optimization of MO Bragg diffraction of guided optical waves by MSW in YIG films by using inclined magnetic bias field [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001, 225: 394-402.
- [4] 武保剑, 刘公强. 静磁波与导波光的磁光耦合理论[J]. 光学学报, 1999, 19(5): 633-639.
- [5] Weinberg I J. Insertion loss for magnetostatic volume waves[J]. IEEE Trans Magn, 1982, 18(6): 1 607-1 609.

编辑 刘文珍