

应用微波网络分析仪测量固态双复介质的电磁特性参数及其误差评估*

汪忠柱, 姚学标, 胡国光, 方以坤

(安徽大学物理系, 安徽合肥 230039)

摘要: 介绍了应用微波网络分析仪测量固态双复介质的磁导率、电容率(介电常数)和吸波特性的原理、方法, 分析了减小测量误差的基本条件。该方法具有样品易于制作、测量简单准确, 特别是能分析材料的吸波特性等优点。

关键词: 微波网络分析仪; 电磁特性参数; 测量误差

中图分类号: TM936

文献标识码: B

1 引言

近年来, 随着吸波材料在微波通信、微波暗室、抗电磁辐射和伤害、微波加热以及电子对抗等领域中广泛应用, 研究和开发在实用的射频和微波频段中满足以上各种要求的微波材料和吸波材料已成为一个重要课题, 决定材料电磁特性的复磁导率和复介电常数的准确测量更变得十分重要。

目前, 已采用了很多方法^[1~3]进行了这方面的测量, 但均存在操作复杂、样品尺寸要求苛刻、精确度不高等不足之处。本文介绍的应用微波网络分析仪的测量方法基本可以克服上述缺点, 同时还能与吸波材料和传输特性的测量分析联合使用, 特别适合于兼备铁磁、介电和金属特性即损耗较大的固态双复介质的测量。

2 基本原理

在理想情况下, 考虑到被测样品安装在空气介质的波导管中, 其散射参量 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 同反射系数 Γ 和传输系数 T 有如下关系:

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (1a)$$

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (1b)$$

其中 Γ 是在本征阻抗分别为 Z_0 和 Z_s 界面上反射系数, T 为样品中传输系数, 当样品的长度趋于无穷大 ($L \rightarrow \infty$) 时, 则有

$$\Gamma = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} + 1} \quad (2)$$

$$T = \exp[-j\omega \sqrt{\mu\epsilon} \cdot d] \\ = \exp[-j \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r\epsilon_r} \cdot d] \quad (3)$$

式中, ω 为测量信号的角频率, $\mu (= \mu_0\mu_r)$ 和 $\epsilon (= \epsilon_0\epsilon_r)$ 分别为样品的磁导率和电容率, μ_r 和 ϵ_r 就是要测定的复相对磁导率和复相对电容率, $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 为自由空间中光速, d 为沿信号传播方向的样品介质长度。

上面就是测量的基本公式, 通过测量 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 可由(1)式求出 Γ 和 T , 从而可由(2)、(3)式来计算 μ_r 和 ϵ_r 。由(2)、(3)式可得:

$$\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)^2 \quad (4)$$

$$\mu_r\epsilon_r = -\lambda_0^2 \left[\frac{1}{2\pi d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (5)$$

当利用波导样品活塞进行测量时, 由(4)式和(5)式可得:

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \left[\frac{\mu_r \epsilon_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right] = - \left[\frac{1}{2\pi d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2,$$

式中, $\lambda_g = \text{Re}[1/\sqrt{\mu_r \epsilon_r/\lambda_0^2 - 1/\lambda_c^2}]$ 。

$$\text{所以, } \mu_r = \frac{1 + \Gamma}{\lambda_g(1 - \Gamma) \sqrt{1/\lambda_0^2 - 1/\lambda_c^2}} \quad (6)$$

$$\epsilon_r = (1/\lambda_g^2 + 1/\lambda_c^2) \lambda_0^2/\mu_r \quad (7)$$

以上各式中, λ_0 为自由空间中波长, λ_c 为波导的截止波长, λ_g 为波导内充满双复介质材

料时波导波长。

3 测试系统和测量方法

3.1 测量系统

测量系统框图如图 1 所示,其中 A、B 为安置被测样品用的波导活塞,分别为反射式和透射式测量之用,C 为平衡衰减器,用作测量前校准调节。

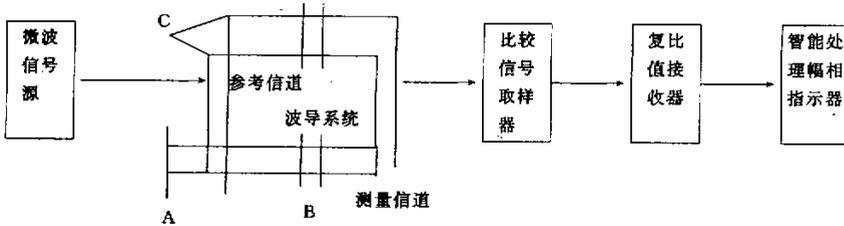


图1 微波网络分析仪测量系统

3.2 测量方法

测量前,须将由同一信号源分成的测量信号和参考信号经过波导系统后进行校准,即调准好两者的复比值作为标准参考值,包括幅值和相位两部分。测量时,矩形样品(对应于矩形波导)先后放置在波导活塞 A 和 B 中,并测量来自被测样品的反射信号和传输信号同参考信号的幅值和相位的比较值,由幅、相指示器先后提供精确的读数,它们同标准参考值之差即为所要测量的复数型散射参量 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 的幅值和相位。

最后将测量数据输入计算机中,按照 μ_r 和 ϵ_r 的计算公式所编排的程序进行复数运算并打印出结果。改变信号源的频率,按上述步骤可测定 μ_r 和 ϵ_r 虚部及实部的频谱。

应当指出,在该测量方法中,对被测样品只要求其横截面积恰好等于波导的横截面积,而对样品的长度不作特殊限制,故该方法中样品比较容易制作。

此外,若将材料置于 A 处或者 B 中,则

可以定量测试材料的反射式或透射式吸收衰减量。改变信号源的频率和材料涂层的厚度,通过一系列测量,可以精确分析材料的微波吸收特性。

4 测量误差的评估

本测量方法中误差来源于测量系统、样品同波导管间存在气隙、样品表面不平整度以及高次激励等。由于形成这些误差模型的复杂性,这里仅能对测量系统的误差进行分析,并讨论了减小测量误差所要求的最佳样品尺寸。

4.1 测量系统的误差

由于反射信号和透射信号在矩形波导管中传输必伴随一定损耗,因此系统误差取决于测量的 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 的幅值的误差。对该测量系统中 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 的幅值的误差,可应用波导理论推出^[4]。本文中,

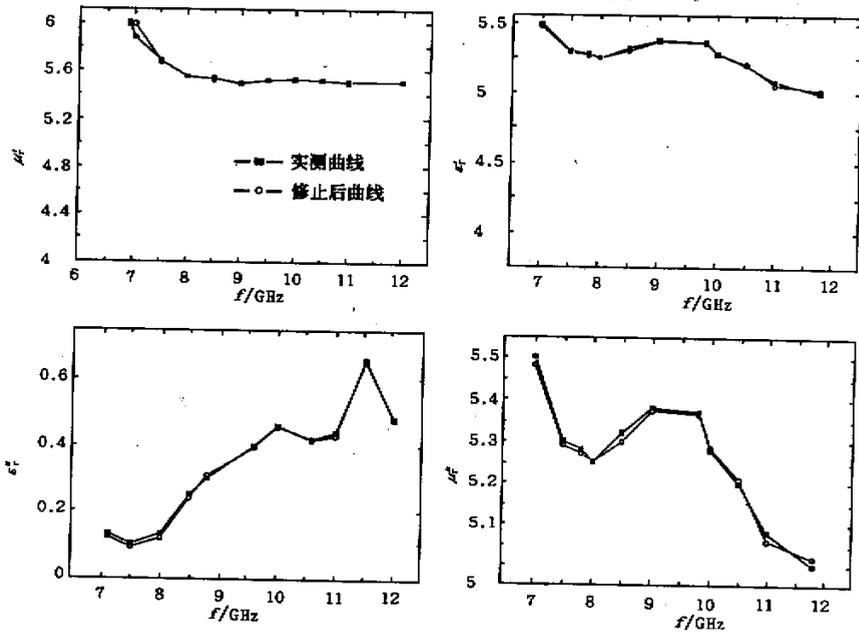


图2 (MnZnCo)₂-W型复合铁氧体的 $\epsilon_r, \mu_r \sim f$ 曲线

我们通过计算机模拟方法即可得出 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 的幅值的误差对 μ_r 和 ϵ_r 测量值的影响。基本思路如下：根据已测得的 $\epsilon_r', \mu_r', \epsilon_r'', \mu_r''$ 频谱曲线，在任意频率 f_0 下，对其特性参数分别改变微小值 $\Delta\epsilon_r', \Delta\mu_r', \Delta\epsilon_r'', \Delta\mu_r''$ ，由(1)、(6)、(7)式可计算出相应的 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 的幅值，逐一改变 $\Delta\epsilon_r', \Delta\mu_r', \Delta\epsilon_r'', \Delta\mu_r''$ 值，使计算的 $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 的幅值在系统误差范围内，满足上述要求最大的 $\Delta\epsilon_r', \Delta\mu_r', \Delta\epsilon_r'', \Delta\mu_r''$ 值即为测量系统在该频率下的误差值。我们用本文介绍的方法测量了平面六角晶系 (MnZnCo)₂-W 型复合铁氧体样品的 μ_r 和 ϵ_r 随频率关系曲线，如图2所示，同时给出了对系统误差进行修正后的曲线。从图2可看出：(1)得到最大的测量误差值 $\Delta\epsilon_r' = \pm 0.02, \Delta\mu_r' = \pm 0.03, \Delta\epsilon_r'' = \pm 0.02, \Delta\mu_r'' = \pm 0.03$ ，如果样品尺寸合适，其误差范围必在 $\pm 1\%$ ，符合实验要求；(2)修正曲线随频率的变化情况与测量曲线很好地符合，说明此模拟方法是可行的；(3) ϵ_r', μ_r' 的

峰值频率分别对应电极化共振和自然共振频率，与文献[5]的结果相符合。

4.2 减小测量误差的条件

由于测量样品的尺寸如果接近或等于 $\lambda/2$ 整数倍时 (λ 为沿样品介质传播的信号波长)，则在样品内形成驻波以及产生多重反射信号的干涉抵消，强烈地吸收信号的能量，使 $S_{11}(\omega)$ 的幅值接近于 0。根据信号在波导内传输必伴随着一定损耗，当 $S_{11}(\omega)$ 的幅值接近于 0 时，其幅值和相位误差都增大，反之，当 $S_{11}(\omega)$ 的幅值越接近于 1 时，误差减小，同时由于当 $S_{21}(\omega)$ 的幅值一般在 0.1~1 之间时， $S_{21}(\omega)$ 的幅值误差和相位误差实际上与 $S_{21}(\omega)$ 的幅值无关，其值分别为 $\pm 0.05\text{dB}$ 和 $\pm 0.4^\circ$ 。因此，为了获得更小的测量误差，必须选择合适的样品尺寸，使 $|S_{11}(\omega)|$ 接近于 1，根据(1)~(3)式可得

$$|S_{11}(\omega)| = \Gamma \left| \frac{1 - e^{-j2k_2d}}{1 - e^{-j2k_2d}\Gamma^2} \right|$$

$$\begin{aligned}
&= \Gamma \sqrt{\frac{2 - 2\cos 2k_2d}{1 - 2\Gamma^2\cos 2k_2d + \Gamma^4}} \\
&= \Gamma \sqrt{\frac{1}{\Gamma^2 + \frac{(\Gamma^2 - 1)^2}{2 - 2\cos 2k_2d}}}
\end{aligned}$$

显然,当 $2k_2d = (2n + 1)\pi$ 时, $|S_{11}(\omega)|_{\max} = 2\Gamma/(1 + \Gamma^2)$, 即 $d = (2n + 1)\lambda/4$, 一般

取 $d = \lambda/4$, 其中 $\lambda(= c/f \sqrt{\epsilon_r \mu_r})$ 为频率为 f 的信号在样品介质中的波长。表 1 给出当信号频率 $f = 9\text{GHz}$ 时, 不同样品尺寸对测量结果影响。其中, $\lambda = 5\text{mm}$ (由上式和图 2 可得)。

表 1 不同样品尺寸的测量结果

d mm	$ S_{11}(\omega) /\text{dB}$		误差值	
	理论值	测量值	$\Delta\epsilon_r''$	$\Delta\mu_r''$
1.00	0.520	0.480	0.016	0.021
1.25	0.550	0.535	0.010	0.015
1.85	0.422	0.370	0.021	0.030
2.20	0.245	0.185	0.030	0.036

5 讨论和结论

(1) 众所周知,网络的 A 参量在微波频段很难准确测量,而用微波网络分析仪测量 S 参量是简单和准确的,所以本文介绍的测量方法符合今后发展的方向。

(2) 本测量方法中,对于损耗大的双复

介质材料,在相同的样品条件下,更能满足 $L \rightarrow \infty$ 的理想条件,从而可以提高测量的精度,特别适用于测量吸收材料的吸波特性和相关参量。对于损耗非常小 ($\text{tg}\delta < 0.01$) 的样品,用该方法很难精确地测量电磁特性参数,可以通过电磁共振方法测量^[6]。

(3) 我们已通过不同的方法测量自己研制的 W 型和 Y 型平面六角晶系铁氧体吸收材料的复磁导率和复电容率以及吸收特性,测量结果表明本文介绍的方法更能实现高精度,今后拟进一步改进波导装置和分析系统,使之实现自动化。

参考文献:

[1] 汤世贤. 微波测量[M]. 北京:国防工业出版社, 1991.
[2] 钮茂德. 微波实验指导书[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1987.
[3] Nicolson A M, Ross G F. IEEE Trans Instrum Meas,1982,19:377-382.
[4] DK 切格(李永贤译). 世界图书出版公司,1992.
[5] 姚学标,胡国光,等. 功能材料,1999,30(4).
[6] Hakki B W, Coleman P D. IRE Trans Microwave Theory Tech,1960,8:402-410.

作者简介:汪忠柱(1977—),男,安徽大学物理系在读硕士研究生,师从姚学标教授。

Measurement of Electromagnetic Property Parameters of Solid Double-Complex Medium by Microwave Network Analyzer and Evaluation of Error

WANG Zhong-zhu, YAO Xue-biao, HU Guo-guang, FANG Yi-kun
Department of physics, Anhui University, Hefei 230039, China

Abstract: Measurements of complex permittivity, permeability and microwave absorbing property have been done with microwave network analyzer. The measurement principle, experiment way and conditions of improving accuracy have been discussed thoroughly. The advantages of the method are the specimen can be made easily and measured accurately and simply, especially can be used in analysing the microwave absorbing properties.

Key words: microwave network analyzer; electromagnetic property parameters; measurement error

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,推出多套微波射频以及天线设计培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



微波射频测量仪器操作培训课程合集

搞硬件、做射频,不会仪器操作怎么行!对于射频工程师和硬件工程师来说,日常电路设计调试工作中,经常需要使用各种测试仪器测量各种电信号来发现问题、解决问题。因此,熟悉各种测量仪器原理,正确地使用这些测试仪器,是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能,该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟练掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器;该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装,包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材,能够帮助微波、射频工程师快速地熟练掌握矢量网络分析仪使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器,因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解,也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解,能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>