

# 应用微波网络分析仪测量固态双复介质的磁导率 电容率及吸波特性

姚学标 胡国光 尹萍 李文凤

安徽大学物理系 合肥 230039

本文介绍了应用微波网络分析仪测量固态双复介质的磁导率、电容率及吸波特性的原理和方法。该方法的优点是样品易于制作，测量简便准确，特别是能同材料吸波特性的测量联合使用。

## 1 引言

铁氧体材料和铁电体材料既有铁磁性又有介电性，在简谐电磁场作用下其相对磁导率和相对电容率（又常称相对介电系数）均呈现复数形式，一般称为双复介质。它们既能产生磁致损耗，又能产生电致损耗，因而是优良的电磁波吸收材料。随着吸波材料在射频和微波频谱中广泛应用，特别是通讯和电子对抗技术中重要应用，决定材料吸波特性的复磁导率和复电容率的测量便变得十分重要。

多年来已采用了很多方法<sup>[1-3]</sup>进行这方面的测量，但均存在要求样品尺寸苛刻而难以制作，测量误差较大，特别是很难同材料的吸波特性测量联合使用等不足之处。本文介绍的用微波网络分析仪的测量方法，可以克服上述缺点，特别适合于兼备铁磁、介电和金属特性即损耗较高的固态双复介质的复磁导率、复电容率及吸波特性的测量。

## 2 基本理论

### 2.1 基本模型和基本公式。

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，如图 1 所示。我们知道，其散射参数  $S_{11}(\omega)$  和  $S_{21}(\omega)$  同反射系数  $\Gamma$  和传输系数  $T$  有如下关系

$$1. \quad S_{11} = \frac{(1 - \Gamma)^2 \Gamma^2}{1 - \Gamma^2 \Gamma^2}, \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma^2) \Gamma}{1 - \Gamma^2 \Gamma^2}.$$

其中  $\Gamma$  是在本征阻抗分别为  $Z_0$  和  $Z_s$  界面上反射系数，当样品的长度近似为无穷大 ( $L = \infty$ ) 时，则有

$$\Gamma = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_s}{\epsilon_s}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_s}{\epsilon_s}} + 1}$$

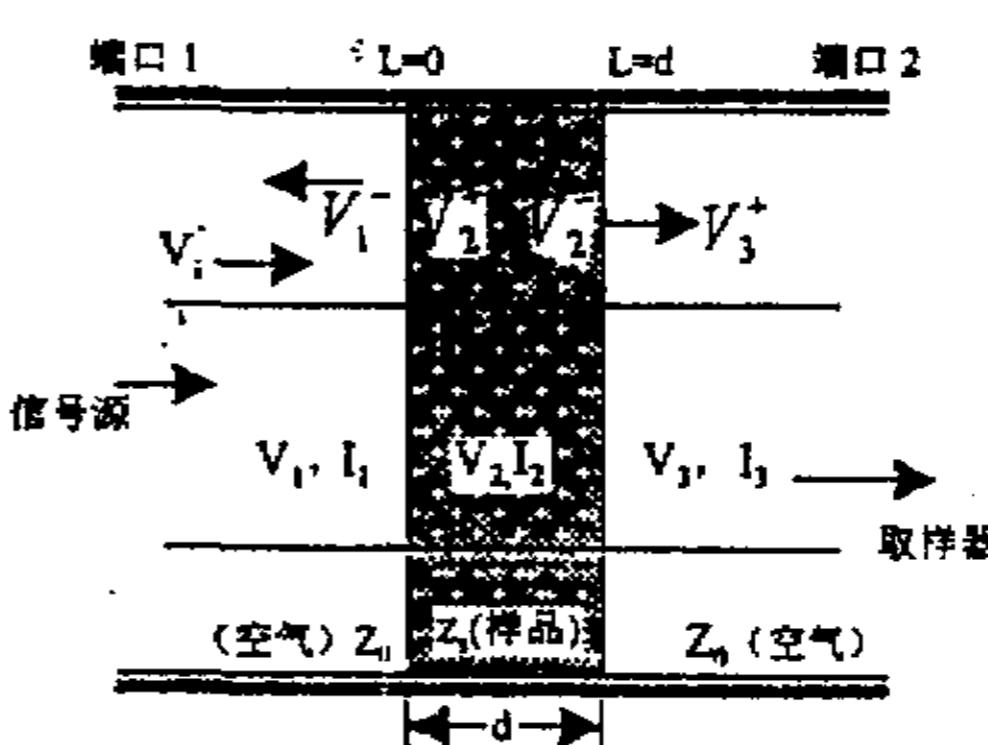


图 1 填充样品介质的波导传输模型

同时，传输系数  $T$  也可写为

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

式中， $\omega$  为测量信号的角频率， $\mu = \mu_0\epsilon_r$  和  $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$  分别为样品材料的磁导率和电容率， $\mu_r$  和  $\epsilon_r$  就是要测定的复相对磁导率和复相对电容率， $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$  为自由空间中光速。

上面就是测量的基本公式。通过测量  $S_{11}(\omega)$  和  $S_{21}(\omega)$  可由方程 (1) 求出  $\Gamma$  和  $T$ ，从而可由方程 (2) (3) 来计算  $\mu_r$  和  $\epsilon_r$ 。

## 2. 2 $\mu_r$ 和 $\epsilon_r$ 的测量计算公式

在图 1 所示的各个区域中，显然存在如下电磁关系（不计共同的时间因子）：

$$V_1 = V_1^+ e^{-j\gamma_0 l} + V_1^- e^{j\gamma_0 l}, I_1 = \frac{1}{z_0} (V_1^+ e^{-j\gamma_0 l} - V_1^- e^{j\gamma_0 l}); (l \leq 0) \quad (4)$$

$$V_2 = V_2^+ e^{-j\gamma l} + V_2^- e^{j\gamma l}, I_2 = \frac{1}{z_s} (V_2^+ e^{-j\gamma l} - V_2^- e^{j\gamma l}); (0 \leq l \leq d) \quad (5)$$

$$V_3 = V_3^+ e^{-j\gamma_0(l-d)} + V_3^- e^{j\gamma_0(l-d)}, I_3 = \frac{1}{z_0} V_3^+ e^{-j\gamma_0(l-d)}. (l \geq d) \quad (6)$$

其中， $\gamma_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$  为自由空间中传播常数， $\gamma = \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu_r\epsilon_r}$  为介质中传播常数， $d$  为样品介质的长度。

图 1 中边界条件是：

$L=0$  处：  $V_1=V_2$ ,  $I_1=I_2$ ;

$L=d$  处：  $V_2=V_3$ ,  $I_2=I_3$ .

利用上面的边界条件和方程 (4) 可将  $\Gamma$  和  $T$  写

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad , \quad (7)$$

其中， $K = \frac{\{S_{11}(\omega) - S_{21}(\omega)\} + 1}{2S_{11}(\omega)}$ ;

$$T = \frac{\{S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)\} \cdot \Gamma}{1 - \{S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)\} \cdot \Gamma}, \quad (8)$$

由方程 (2) (3) 我们得到

$$\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = \left( \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right)^2 = x \quad (9)$$

$$\mu_r \epsilon_r = - \left[ \frac{c}{\omega d} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2 = y \quad (10)$$

则有  $\mu_r = \sqrt{xy}$  , (11)

$$\epsilon_r = \sqrt{\frac{y}{x}} \quad (12)$$

为了利用波导样品活塞进行测量, 可将方程 (9) 和 (10) 写成如下形式

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left[ \frac{\mu_r \epsilon_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right] = - \left[ \frac{1}{2\pi d} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2, \quad (13)$$

式中,  $\text{Re} \left( \frac{1}{\Lambda} \right) = \frac{1}{\lambda_c} > 0$ ,

$$\therefore \mu_r = \frac{1+\Gamma}{\Lambda(1-\Gamma) \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}, \quad (14)$$

$$\epsilon_r = \frac{\left( \frac{1}{\Lambda^2} + \frac{1}{\lambda_c^2} \right) \lambda_0^2}{\mu_r}. \quad (15)$$

式中,  $\lambda_0$  为自由空间中波长,  $\lambda_c$  为波导的截止波长。

### 3 测试系统和测量方法

#### 3. 1 测试系统

微波网络分析测量系统框图如图 2 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。

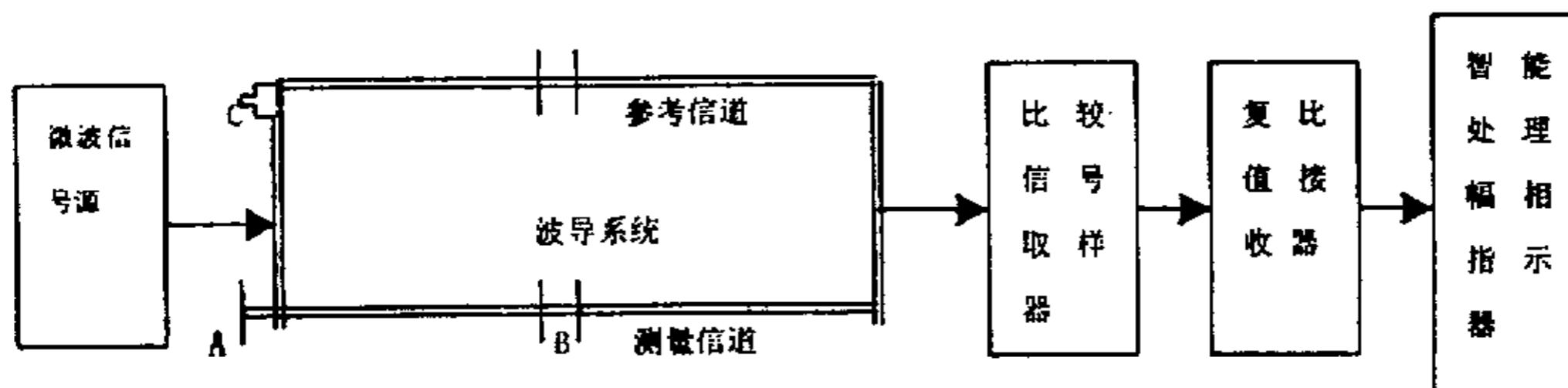


图 2 微波网络分析仪测量系统

应当注意，微波信号源和波导系统必须相匹配，比如 3cm 微波信号源必须配置 3cm 波导系统，且波导系统是由对称结构的参考信道和测量信道组成。

### 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份。

测量时，将矩形样品（对应于矩形波导）先后放置在波导活塞 A 和 B 中，并分别测量来自被测样品的反射信号（背面为短路条件）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，它们同校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  $\mu_r$  和  $\epsilon_r$  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，按照上述步骤可以测定  $\mu_r$  和  $\epsilon_r$  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和内截面积，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，若将材料涂层置于 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（dB 值）。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 讨论和结论

4. 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 参量是简便和准确的，所以本文介绍的测量方法是迎合今后发展的方向。

4. 2 本测量方法中，对于损耗大的双复型介质材料，在相同的样品长度条件下，更能满足  $l = \infty$  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。

4. 3 我们已采用本方法测量自己研制的 W 型和 Y 型平面六角晶系铁氧体微波吸收材料的复磁导率、复电容率及吸收特性，测量结果是令人满意的。今后拟进一步改进波导装置和分析系统，使之实现高精度和自动化。

## 参考文献

- [1] 汤世贤编著. 微波测量. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [2] 钮茂德主编. 微波实验指导书. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1987.
- [3] A. M. Nicolson, G. F. Ross. IEEE Trans. Instrum. Meas., 19(1982): 377-382.

## 微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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量测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悉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悉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>

