

磁性薄膜电磁参数测试技术

陈雪飞 郭高凤 周扬 李恩

(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)

文 摘 扼要介绍了近 15 年国内外在磁性薄膜材料电磁参数测试方法的概况及技术特点, 这些方法主要包括带状线法、微带线法、波导法及共面波导法、终端阻抗及短路法和谐振腔法。

关键词 磁性薄膜, 电磁参数, 网络参数法, 谐振腔法

Measuring Methods of Electromagnetic Parameters of Magnetic Thin Film Material

Chen Xuefei Guo Gaofeng Zhou Yang Li En

(Institute of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Tech. of China, Chengdu 611731)

Abstract In the thesis, the measuring methods of electromagnetic parameters of magnetic thin film and the technical features in the last 15 years are summed up, which include strip-line method, micro-strip line method, waveguide method, coplanar waveguide method, terminal impedance method, terminal short-circuit method and resonant cavity method.

Key words Magnetic thin film, Electromagnetic parameters, Network parameter method, Resonant cavity method

1 引言

磁性薄膜主要是指由过渡元素铁、钴、镍及其合金等能够直接或间接产生磁性的物质来制备的薄膜, 厚度一般在几十个纳米微米至几微米之间。随着这种薄膜材料在隐身技术、微波通信、电子对抗、电磁兼容等领域中的广泛应用, 磁性薄膜的微波特性的测量和表征已成为该领域前沿课题和热点课题。国外对磁性薄膜材料电磁参数在微波频段下的测试工作已开展了十多年, 在国内也开展了相应的研究工作, 并取得了一定的成果。

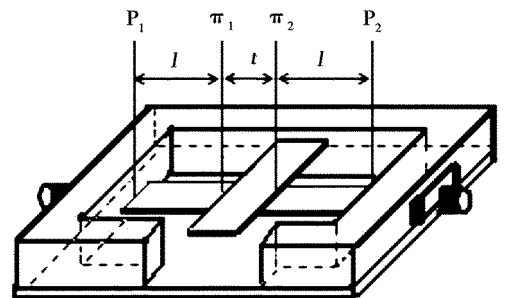
在微波和毫米波段, 材料的电磁参数测试方法按测量原理可分为网络参数法、谐振腔法两大类^[1]。对磁性薄膜材料的电磁参数的测试, 常用的方法为网络参数法, 即通过测试放置有被测薄膜材料的微波传输线的散射参数, 计算出被测材料的电磁参数。所采用的传输线的类型有: 带状线、微带线、矩形波导、共面波导及同轴线等。对于薄膜的谐振腔法测试, 目前已公布的国内外相关技术还不完善。本文扼要介绍各种测量方法。

2 网络参数法

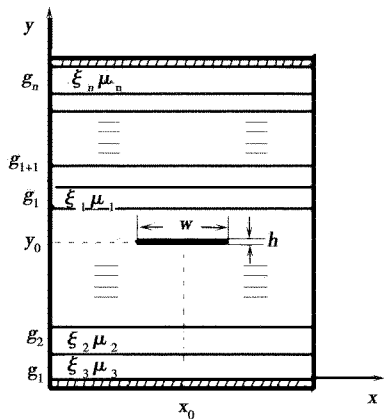
2.1 带状线法

采用带状线测试材料的电磁参数的方法最早是由

Walter Barry 提出的^[2]。1993 年, A. Fessant 等用带状线法在室温下 3 MHz~3 GHz 内对 CoZr 的非晶薄膜 ($0.4\sim 5\ \mu\text{m}$) 进行了磁导率的测量^[3](图 1)。将玻璃基片上的 CoZr 膜切割成条状, 然后装入带状线夹具中, 使用网络分析仪测量其 S 参数。由于样品体积小, 对带状线内场结构影响较小, 可近似认为传输的是准 TEM 模式。采用格林函数法和变分法对 Laplace 方程求解, 结合传输线的阻抗和 S 参数, 利用迭代法可解出薄膜复磁导率。这种方法具有测试频带较宽, 精度较高, 操作比较简单的优点, 适合于损耗较低的薄膜材料的测量。



(a) 加载样品的测试设备

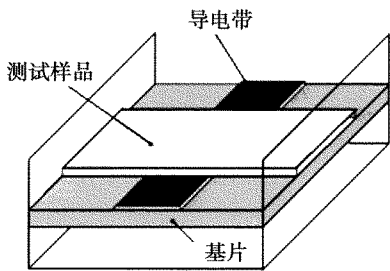


(b) N层传输线横截面
图1 带状线法测试结构

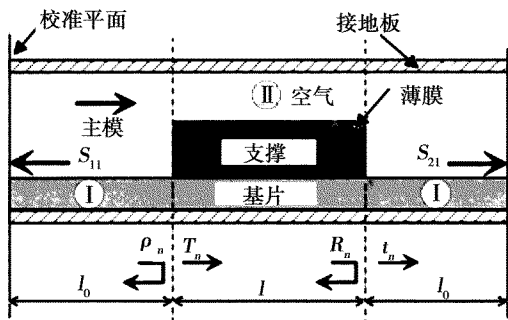
Fig. 1 Test structure of strip-line method

2.2 微带线法

1998年, P. Queffelec 等将测试样品放于悬置微带线上^[4](图2), 实现了0.1~10 GHz内对0.5~100 μm 厚的铁磁薄膜的电磁参数测试。



(a) 加载样品的测试设备



(b) 测试夹具横截面

图2 悬置微带线测试结构

Fig. 2 Test structure of suspended microstrip line

微带线法主要原理为:将试样放在支撑台 II 上, 用网络分析仪测得等效网络 S 参数。由于微带传输模式中存在高次模, 需对电磁场进行全波分析。正向问题为:对霍姆兹兹方程进行傅里叶展开, 然后利用时域法和 Galerkin 方法对方程求解, 将 S 参数表示为薄膜复介电常数和复磁导率的函数。逆向问题为:采用对目标函数求极值和迭代法求出复介电常数和复磁导率^[5]。利用这种方法测试时, 操作方便, 结构简单, 但分层介质的电磁场计算复杂, 并容易激励起高次传输模式, 测试误差大。

2001年, E. Salahun 等人对上述悬置微带线法进行了改进, 将被测试样品放置于空气微带线中^[6](图3), 同样通过对 S 参数的测试, 在常温实现 130 MHz~7 GHz 内对矩形形状、0.1~1 800 μm 薄膜样品的电磁参数测试, 测试样品材料均为各向异性铁磁材料, 测试误差 $<6\%$ 。这种方法的优点是不需要任何磁性参考样品, 且测试误差较小。微带线法适合测试频率较高或者损耗较大的薄膜材料。

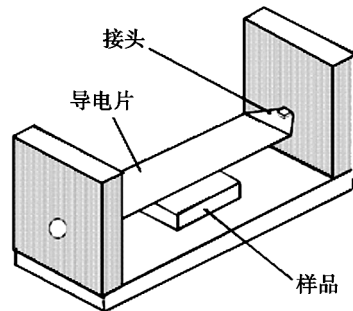


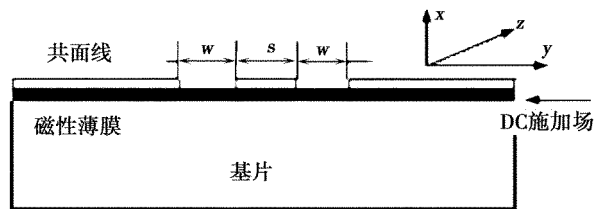
图3 空气微带线测试结构

Fig. 3 Test structure of air-filled microstrip line

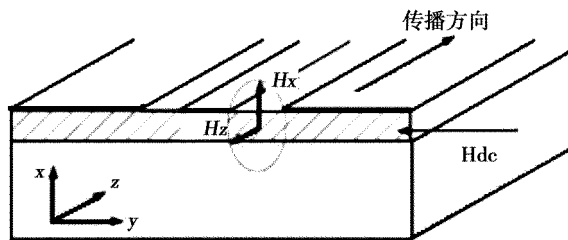
2.3 波导及共面波导法

使用波导法测试薄膜电磁参数较早是由 M. Kamarei 等人在 1991 年提出的^[7], 该方法可同时测量薄膜的复介电常数和复磁导率。在 S 波段对 0.2 μm 的 FeCo 基薄膜进行了测试, 结果表明, 在对微米级薄膜测试时, 该方法测试误差较大。该方法适用于对多层介质样品的电磁参数的测量。

2005年, Didier Vincent 等将磁性薄膜材料作为介质基板材料制作共面波导^[8], 利用网络参数法完成了磁性薄膜材料磁导率测试(图4), 共面传输线材料为金。



(a) 测试夹具横截面



(b) 薄膜内部磁场分布

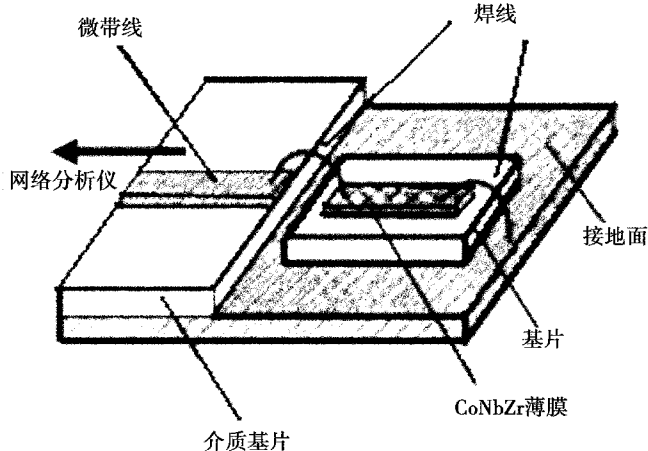
图4 共面波导法测试结构

Fig. 4 Test structure of coplanar waveguide method

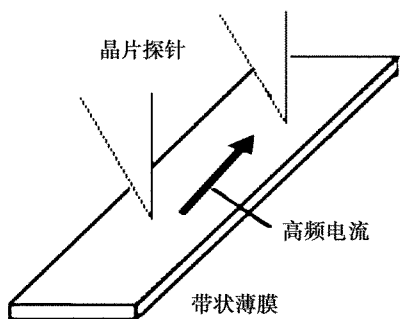
在 1 MHz~15 GHz 内,800℃下和 165 kA/m 的 DC 施加场上,测试了 2.5 μm 的 YIG 薄膜样品,在高频下的测试结果与 Polder 模型的吻合度较高,低频测试时精度较低。在 1 MHz~50 GHz 内测试了 35 μm 的钽铁氧体膜,未给出准确度分析。该法制作测试样品复杂,共面波导体需要紧密覆盖薄膜材料上,使得部分薄膜是镀于金属上,限制了薄膜材料的基底材料,不利于薄膜材料的研究、应用和无损检测。

2.4 终端阻抗及短路法

S. Yabukami 等从 1999 年开始,将磁性薄膜作为传输终端短路线,通过测试薄膜的阻抗变化获得磁性薄膜材料微波频段下磁导率^[9]。首先将磁性薄膜材料的一端接地,另一端连接于微带线内导体,构成测试传感器,后利用测试探针直接测试薄膜阻抗(图 5)。



(a) 加载样品的测试设备



(b) 薄膜的阻抗测试示意图

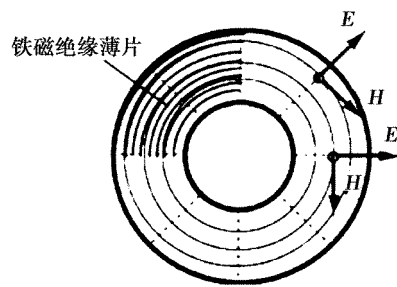
图 5 终端阻抗法测试结构

Fig. 5 Test structure of terminal impedance method

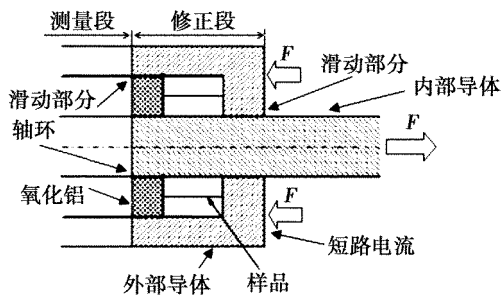
终端阻抗法对薄膜的宽度有严格要求,样品制作要求高。薄样品测试时,基底材料及短路面对测试结果影响大,测试误差大。

O. Acher 课题组自 1993 年就开展了磁性薄膜材料微波频段下电磁参数测试技术研究^[10~12]。该课题组首先将薄膜材料镀于柔性基片上,并将其缠绕在 7 mm 同轴线内导体上,塞入 7 mm 传输线中,制作成测试样品,完成薄膜样品(100 MHz~18 GHz)电磁参数测试,如图 6(a)所示。采用缠绕的方法测试时,由于缠

绕过程中每层间必然会有间隙,易引起高次模式,给测试结果带来较大测试误差。由于薄膜样品间存在间隙,又采用将测试样品置于 7 mm 传输线中,可利用终端短路法测试不同压力下薄膜材料(1 MHz~18 GHz)磁导率,如图 6(b)所示。



(a) 同轴缠绕法



(b) 同轴终端短路法

图 6 APC 7 mm 传输线测试示意图

Fig. 6 Schematic diagram of APC 7 mm transmission line test

3 谐振腔法

目前国内外一般都使用高 Q 谐振腔法测量低损耗电介质样品的复介电常数,但对于固体电介质薄膜和薄片的复介电常数的测量都不完善。国内能够测量最薄为 0.1 mm 表面光滑的固体电介质薄片的复介电常数,但无误差分析,准确性尚待探讨。传统的高 Q 谐振腔法是将样品放置在谐振腔的短路板上,由于该区域电场强度很弱,而样品又很薄,导致加载样品前后谐振腔谐振频率和 Q 值的变化很小,从而难以准确计算出薄样品的复介电常数。国内目前的改进方法是将样品置于腔中电场较大处。在文献^[13]中,选择了合适的垫片材料,抬高样品把样品置于腔中电场较强处,以加大品质因数和共振频率的改变量;采用固定腔体的几何尺寸,用测量谐振频率的方法精确求得腔体的长度;利用高 Q 谐振腔放置样品前后品质因数和共振频率的变化,计算出样品的复介电常数。

华中科技大学依据谐振腔内电磁场的特性及薄膜材料体积小特点,采取了较大的模指数、高品质因数、小耦合系数等措施,设计了在 2 GHz 工作模式为 TE₁₀₅ 的反射式矩形谐振腔^[14](图 7),采用微扰法完成 2 GHz 附近的薄膜材料电磁测试。但无具体的误差分析,准确程度尚待探讨。

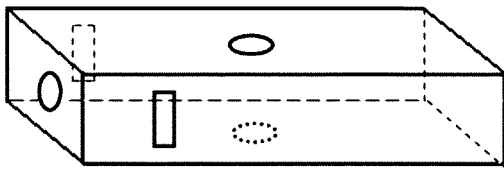
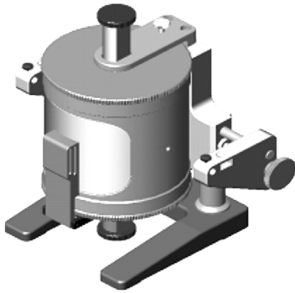
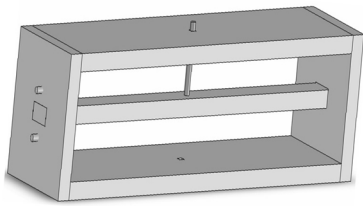


图7 矩形谐振腔微扰法测试结构
Fig.7 Test structure of Rectangular resonant cavity perturbation method

电子科技大学近几年也已开展了相应的研究工作,利用介质谐振器法完成4、10 GHz两个频率点附近薄膜磁导率及表面电阻测试,如图8(a)所示。利用带状线谐振器法开展了0.6~10 GHz薄膜材料电磁参数测试技术研究^[15],如图8(b)所示,在测试技术上取得较大进展,并利用带状线法开展了一些研究工作。



(a) 介质谐振器



(b) 带状线谐振器

图8 电子科技大学磁性薄膜材料测试装置

Fig.8 Testing device of UESTC magnetic thin film materials

4 结语

网络参数法对较高损耗微波薄膜材料进行电磁参数的测试,是比较成熟的技术。国外常采用的网络测试方法中,测试样品厚度不能太薄,并且很难消除基底基片对测试结果的影响,测试误差大。对于薄膜样品,因其厚度较薄,单一片样品放置于传输线中,散射参数的变化极小,受测试仪器散射参数测试误差的影响,电磁参数的测试误差较大。大部分文献只测试了磁性薄膜材料磁导率,未测试复介电常数,并且部分测试方法样品的制作工艺复杂,很难适应薄膜材料电磁参数测试的现状要求。现有测试方法虽然能对薄膜材料电磁参数进行测试,但对纳米多层磁性薄膜,在测量的稳定性和准确性等方面都还存在着一些缺陷。现有的谐振腔法中,常采用矩形谐振腔,在1 GHz附近测试所需的矩形波导谐振腔尺寸极大,所需制作的测试样品较大,测试夹具及样品的制作难度大。当磁性薄膜材料在高

频率体现出金属特性时,至今尚无表征材料电磁特性的物理量和测试方法。

参考文献

- 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
- Walter Barry, A broad-band, Automated. Stripline technique for the simultaneous measurement of complex permittivity and permeability. IEEE, Transactions On Microwave Theory And Techniques, 1986; MIT-34;1
- Fessant A, Gieraltowski J, Loaec L et al. Influence of In-plane anisotropy and eddy currents on the frequency spectra of the complex permeability of amorphous coZr thin films. IEEE, Transactions On Magnetics, 1993;29:1
- Patrick Queffelec, Marcel Le Floch, Philippe Gelin. Broad-band characterization of magnetic and dielectric thin films using a micro-strip Line. IEEE, Transactions On Instrumentation And Measurement, 1998;47:4
- 陶洁. 磁性纳米膜微波电磁参量谐振腔法测量研究. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文, 2006
- Erwan Salahun, Patrick Quéffelec, Marcel Le Floch et al. A Broadband Permeameter for "in situ" measurements of rectangular samples. IEEE, Transactions On Magnetics, 2001;37:4
- Kamarei M, Daoud N. Measurement of complex permittivity and permeability of dielectric materials placed on a substrate. Electronics Letters, 1991;27(1):68~70
- Didier Vincent, Thomas Rouiller, Constantin Simovsky et al. A new broad-band method for magnetic thin-film characterization in the microwave range. IEEE, Transactions On Microwave Theory And Techniques, 2005; 53: 4
- Yabukami S, Takezawa M, Uo T et al. An evaluation of permeability for striped thin films in the gigahertz range. 2000; 87:5 998~6 000
- Acher O, Queste S, Barholz K U et al. High-frequency permeability of thin NiFe/IrMn layers. Journal of Applied Physics, 2003;93:6 668~6 670
- Acher O, Boscher C, Brule B et al. Microwave permeability of ferromagnetic thin films with stripe domain structure. Journal of Applied Physics, 1997;81:4 057 ~4 059
- Olivier Ache, Vincent Dubuget, bastien Dubourg S. How to retrieve more information on magnetic films from microwave permeability measurements. IEEE, Transactions On Magnetics, 2008;44:11
- 吴静静. 固体电介质薄膜、薄片复介电常数的测量研究. 电子科技大学硕士学位论文, 2007
- 张秀成, 聂彦, 何华辉等. 薄膜材料复介电常数与复磁导率测试研究. 华中科技大学学报. 2004;32(4)
- 李恩, 郭高凤, 张其劭等. 一种带状线谐振器及微波薄膜材料电磁参数测试装置. 发明专利. 专利号: ZL 200510022222. 4

(编辑 任涛)