

高温超导薄膜微波表面电阻测试方法*

张映敏** 罗正祥 羊 恺 张其劭

(电子科技大学微波测试中心 成都 610054)

【摘要】 介绍一种工作在 12 GHz 附近的高温超导薄膜微波表面电阻 R_s 测试系统, 该系统采用低损耗高介电常数的蓝宝石构成工作在 TE_{011+d} 谐振模式的介质谐振器, 在 77 K 时, 利用它对高温超导薄膜的微波表面电阻 R_s 进行测试, 提高了整个测试系统的品质因素, 可成功地用于单片 50.8 mm 较大超导薄膜的无损测试, 整个测试系统体积小、操作方便, 且所需实验条件简单, 测试灵敏度高, 具有简便、快捷、适合于工业化生产检测的特点。

关键词 高温超导薄膜; 微波表面电阻; 介质谐振器; 品质因数

中图分类号 TM26; O514.2

高温超导薄膜在微波技术领域应用的一个重要特性参数是微波表面电阻 R_s , 由于薄膜的微波表面电阻 R_s 很小^[1,2], 其测试方法多以微波谐振器 Q 值的测量为基础。谐振器法以其制作简单和测量相对准确的特性赢得青睐, 是目前测量高温超导薄膜微波表面电阻的常用方法。利用谐振器法测量 R_s 的主要方法有波导谐振器法、平面电路谐振器法、平行板谐振器法和蓝宝石介质谐振器法^[3-6]。本文介绍的测试方法属于改进的蓝宝石介质谐振器法, 它是利用高温超导薄膜表面电阻的存在会引起损耗, 使蓝宝石介质谐振器的品质因数发生变化, 通过测量谐振器的固有品质因数 Q 的值, 利用一个简单的线性方程 $Q_0^{-1} = A + BR_s$ 来计算高温超导薄膜的微波表面电阻 R_s 。

1 测试头的结构

测试头由两部分组成: 1) 固定部分, 由一端加载, 另一端开放的蓝宝石圆介质用聚四氟乙烯环同轴地固定于镀银金属截止波导中; 2) 可替代部分, 通常是校准头或待测的高温超导薄膜。直径为 8.3 mm, 高为 5.98 mm 的蓝宝石介质由聚四氟乙烯环支撑固定在金属屏蔽腔的内表面, 一对末端带环的同轴电缆形成磁场耦合, 如图 1 所示。

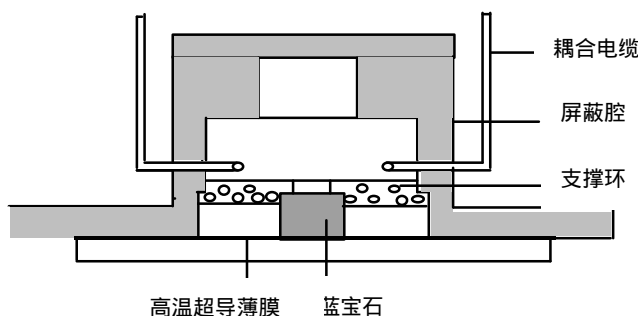


图 1 蓝宝石介质谐振器

装有高温超导薄膜的测试头在 12 GHz 时形成 TE_{011+d} 模介质谐振器, 被测高温超导薄膜可用另

2001 年 9 月 7 日收稿

* 国家超导中心研究基金资助项目

** 女 24 岁 博士生

一待测高温超导薄膜或一个校准头所替换,因此这种测试是无损伤测试。高纯度单晶蓝宝石在液氮温度下有很低的损耗,其高介电常数把大部分电磁能量限制在蓝宝石内和蓝宝石附近,电磁场远离蓝宝石柱表面沿径向按指数衰减,谐振器工作模式具有高 Q 值,保证了测量装置具有较高的测试灵敏度。支撑环由高纯度聚四氟乙烯制成,介电常数小且在77 K时损耗很低,因此它对测试头内的电磁场干扰很小,屏蔽腔是由内表面覆盖银膜的铜制成。设计屏蔽腔的内直径时,保证了测试系统工作主模 TE_{011+d} 的腔体谐振频率在金属腔工作频率 $f=12$ GHz之外。

2 测试原理

无载品质因数 Q_0 可表示为

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{P_d + P_c + P_{HTS}}{w_0 \bar{W}} \quad (1)$$

式中 P_c 是金属屏蔽腔所消耗的功率; P_d 是指蓝宝石介质谐振器和聚四氟乙烯支撑环引入的介质损耗; P_{HTS} 是高温超导薄膜的表面电阻 R_s 所消耗的功率; \bar{W} 是在谐振频率 f_0 时主模式 TE_{011+d} 存储在谐振腔中的总能量,其计算公式如下

$$P_c = \frac{R_{SAg}}{2} \int_{S_{Ag}} |H_t|^2 dS \quad (2)$$

$$P_d = \frac{\epsilon_0}{2} \left[\int_{V_{rod}} \mathbf{e}_{r_1}'' |E|^2 dV + \int_{V_{ring}} \mathbf{e}_{r_2}'' |E|^2 dV \right] \quad (3)$$

$$P_{HTS} = \frac{R_{SHTS}}{2} \int_{S_{HTS}} |H_t|^2 dS \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{W} = \frac{1}{2} \left\{ \int_{V_{rod}} (\mathbf{e}_0 \mathbf{e}'_{r_1} |E|^2 + m_0 |H|^2) dV + \right. \\ \int_{V_{ring}} (\mathbf{e}_0 \mathbf{e}'_{r_2} |E|^2 + m_0 |H|^2) dV + \\ \left. \int_{V_{air}} (\mathbf{e}_0 |E|^2 + m_0 |H|^2) dV \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

式中 V_{rod} 、 V_{ring} 和 V_{air} 分别是圆柱形的蓝宝石介质、聚四氟乙烯支撑环和空气所占据的体积; $\mathbf{e}_{r_1}'' + j\mathbf{e}_{r_1}''$ 和 $\mathbf{e}_{r_2}'' + j\mathbf{e}_{r_2}''$ 分别是蓝宝石和聚四氟乙烯的介电常数; ϵ_0 、 μ_0 为自由空间的电介质常数和磁导率; R_{SAg} 和 R_{SHTS} 是镀银屏蔽腔和高温超导薄膜的表面电阻。将式(2)~(5)代入式(1),可得

$$\frac{1}{Q_0} = A + BR_{SHTS} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} A = \frac{\epsilon_0 \left[\int_{V_{rod}} \mathbf{e}_{r_1}'' / |E|^2 dV + \int_{V_{ring}} \mathbf{e}_{r_2}'' / |E|^2 dV \right] + R_{SAg} \int_{S_{Ag}} |H_t|^2 dS}{w_0 \left\{ \int_{V_{rod}} (\mathbf{e}_0 \mathbf{e}'_{r_1} / |E|^2 + m_0 |H|^2) dV + \int_{V_{ring}} (\mathbf{e}_0 \mathbf{e}'_{r_2} / |E|^2 + m_0 |H|^2) dV + \int_{V_{air}} (\mathbf{e}_0 |E|^2 + m_0 |H|^2) dV \right\}} \quad (7) \end{aligned}$$

$$B = \frac{\int_{\text{SHTS}} / H_t / ^2 dS}{w_0 \left\{ \int_{V_{\text{rod}}} (e_0 e'_{r_1} / E / ^2 + m_0 / H / ^2) dV + \int_{V_{\text{ring}}} (e_0 e'_{r_2} / E / ^2 + m_0 / H / ^2) dV + \int_{V_{\text{air}}} (e_0 / E / ^2 + m_0 / H / ^2) dV \right\}} \quad (8)$$

式中 A 、 B 是电磁场积分的比值，当薄膜的微扰不改变谐振器场分布的条件下， A 、 B 的值与超导薄膜的本身没有关系，也不会因薄膜变化而改变，同时由于 A 、 B 都是与电磁场幅度无关的定值，所以只需确定 A 、 B 的值就可以通过测量加载高温超导薄膜的谐振器的固有品质因素 Q_0 来求出 R_s

$$R_s = \left(\frac{1}{Q_0} - A \right) / B \quad (9)$$

由于银的表面电阻 R_{SAg} 已知^[7]，通过对磁介质谐振器内部的电磁场分布进行求值就可以确定 A 、 B 的值，但求解过程十分复杂，故利用实验技术来确定 A 、 B 的值。

3 校准方法

根据基本电磁场理论中的镜像原理，当一个与传感头结构完全一样的校准头与传感头对接时，由于这两个头对称互为镜像，此时传感头端接的是一个镜面。磁力线通过镜面的方向与镜面切线方向平行，因此，镜面 $J=0$ ，相当于传感头端接的是一个磁壁，没有电场能量损耗，其表面电阻 $R_{s1}=0$ 。此时谐振器的主模式变成为 TE_{012+2d} ，但是谐振器内的场分布结构并未发生变化，谐振器的谐振模式对传感头仍是 TE_{011+d} ，谐振频率不发生变化，仍为 f ，其 Q 值为

$$Q'_0 = \frac{w_0(2W)}{2(P_d + P_c)} = \frac{w_0 W}{P_d + P_c} \quad (10)$$

此时 Q'_0 等于 TE_{011+d} 模谐振器加载薄膜的 R_s 为零时的 Q_0 值，所以认为样品 $R_{s1}=0$ ，故有

$$\frac{1}{Q_0} \Big|_{R_s=0} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{P_d + P_c}{w_0 W} = A \quad (11)$$

对于加载的另一片样品选择已知其表面电阻的银片，谐振器的主模式不发生变化，其内部场分布也不发生变化。因此谐振频率基本不变，于是可以确定 B 为

$$B = \left(\frac{1}{Q_0} \Big|_{R_{s2}=R_{\text{Ag}}} - A \right) / R_{\text{Ag}} \quad (12)$$

4 测试系统

采用 HP8341B 频率综合扫频源、HP8756A 标量网络分析仪和 HP7475 绘图仪组成通过式谐振腔测试系统。有载品质因数 Q_L 可用 3dB 带宽法测得^[8]，和 Q_L 之间的关系式为

$$Q_0 = Q_L(1 + b_1 + b_2) \quad (13)$$

式中 b_1 、 b_2 为通过式谐振器输入端口和输出端口的耦合系数。可认为通过式谐振器的输入端口和输出端口是基本上对称，于是

$$b_1 = b_2 = b \quad (14)$$

所以

$$b = \frac{S_{21}}{2(1-S_{21})} \quad (15)$$

式中 S_{21} 是谐振器的插入损耗, 只需测量出 S_{21} 就能确定谐振器的耦合系数, 代入式(13)得

$$Q_0 = Q_L(1+2b) \quad (16)$$

故可以得到该谐振器的固有品质因素。利用测试镜像对接校准头、加载银片、加载高温超导薄膜等不同情况下得到的谐振器的固有品质因素, 代入式(9)可以测出高温超导薄膜的微波表面电阻 R_s 。

5 测试结果

在 77 K 温度下, 空载即传感头端接校准头时的固有品质因素 $\bar{Q}_0 = 8.01 \times 10^4$ (11.372 GHz), $A = 1.249 \times 10^{-5}$ 。用镀银的盖板替换校准头, 测得加载银板的谐振器固有品质因素 $\bar{Q}_0 = 3.29 \times 10^4$ (11.374 GHz), 其工作频率与空载时 ($f_0 = 11.392$ GHz) 相比, 偏移了 0.16%, 频率的变化很小。 $R_{sAg} = 17.6$ m Ω (77 K), 得到系数 B 的值。用所确定的 A 、 B 系数测量高温超导薄膜的微波表面电阻 R_s , 测试结果如表 1 所示。

表 1 测得的不同样品的微波表面电阻

序号	Q_0	$R_s / \text{m}\Omega$
1	57 253	3.088
2	57 378	3.064
3	62 890	2.116
4	62 894	2.116

6 结束语

综上所述, 本文采用的测量高温超导薄膜的方法可行, 这种谐振器结构可以无损伤地测量单片超导薄膜, 直观方便。文中所提出的零电阻校准方法也较成功。研制的谐振器能对 $f = 50.8$ mm 的高温超导膜片进行测量, 测试灵敏度较高。该方法为高温超导薄膜的工作生产提供了快速、简捷的测试手段和方法, 具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Qu Xixin. Recent advances in research on high Tc super conducting thin films. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1996, 25(8):167~172 [曲喜新. 高超导薄膜研究的新进展. 电子科技大学学报, 1996, 25(8):167~172]
- 2 Liu Lonjian, Yang Xiaolong. Study of relation between electro negativity and superconductivity. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1997, 26(suppl):126~131 [刘隆鉴, 杨晓龙关于电负性与超导电性之间关系的研究. 电子科技大学学报 1997, 26(增): 126~131]
- 3 N. Klein, G. Muller, H. Piel *et al.* Appl. Phys. Lett, 1989, 54: 757
- 4 D. E. Oates, A. C. Anderson, P. M. Mankiewich. J. Supercond, 1991, 3: 251

- 5 R. C. Taber. Rev. Sci. Instrum, 1990, 61: 2200
- 6 罗正祥, 羊恺, 卢剑, 等. 高温超导薄膜微波表面电阻的高精度测试技术研究. 低温物理学报, 1998, 20(4): 311~315
- 7 Luo Zhengxiang. Automatic Measurement of Microwave Characteristics of High T_c Superconductive Material. the Proc. of Beijing International Conference on HTS' C92, Beijing 1992
- 8 汤世贤. 微波测量. 北京: 国防工业出版社, 1981

A Measurement Method of Microwave Surface Resistance of Large Area High T_c Super-conductive Thin Films

Zhang Yingmin Luo Zhengxiang Yang Kai Zhang Qishao

(Microwave Testing Center, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The surface resistance R_s of a single piece of high T_c super-conductive thin film can be measured by a sapphire resonator with TE_{011+d} mode non-destructivity, at 77 K. By measuring the value of the resonator's quality factor, the microwave surface resistance R_s of testing sample can be also determined. A new measuring method is presented, and the surface resistance can be calculated. To measure $\phi 50.8$ mm high T_c super-conductive thin film, a special sapphire resonator working at 12GHz is made and used. The method has advantages of non-destructivity, single sample, high Q value, high sensitivity, convenient experiment setup, small volume, and flexibility in operation.

Key words high T_c super-conductive; microwave surface resistance; sapphire resonator; quality factor

· 科研成果介绍 ·

灵巧功率集成电路设计技术

主研人员：李肇基 方健 张波等

灵巧功率集成电路提出了具有非平衡载流子抽出结构的新颖电导调制功率 MOS 器件的非准静态运输理论和网络模型，并将网络模型嵌入 SPICE 中。利用该理论模型分析了不同漂移区长度、非平衡载流子寿命，不同抽出因子以及不同负载情况下的高速 IGBT 的瞬态特性。对器件-电路混合模拟技术进行了深入研究，在并行虚拟计算机(PVM)系统上开发了器件-电路的混合模拟器软件，克服了 SPICE 中模型不足和 PISCES2B 中边界条件的限制。基于通用的 CIF 版图模式，开发了高压功率器件的版图自动生成器。根据实际要求对浮空场板、场限环以及漂移区长度等版图参数进行优化，从而产生相应的 CIF 格式版图。

· 甬江 ·