

# 镜像法高温超导薄膜表面电阻测试装置的改进

曾 成, 罗正祥, 张其劭, 羊 恺

(电子科技大学微波测试中心 成都 610054)

**【摘要】**介绍了一种新的镜像法高温超导薄膜微波表面电阻测试装置,采用小孔对谐振腔内的电磁能量进行耦合,并通过一段 $6\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的填充氧化铍陶瓷介质的波导对电磁能量进行传输,通过在陶瓷块剖面焙银的方法实现磁耦合。与以往的镜像法测试装置相比,该装置易于仿真和制作。使用该装置对两片高温超导薄膜的微波表面电阻进行了测试,并对其中一片高温超导薄膜进行了6次微波表面电阻重复性测量,其表面电阻值 $R_s$ (10 GHz, 77 K)的平均值为 $0.38\text{ m}\Omega$ ,标准偏差为 $0.009\text{ m}\Omega$ ,相对偏差(COV)为2.4%。测试结果表明,该装置具有良好的稳定性。

**关键词** 高稳定性; 高温超导薄膜; 陶瓷焙银; 微波表面电阻值测试

中图分类号 TN129

文献标识码 A

doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.14

## Improvement of Image Method for Measuring the Microwave Surface Resistance of HTS Thin Film

ZENG Cheng, LUO Zheng-xiang, ZHANG Qi-shao, and YANG Kai

(Microwave Center, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new device using image sapphire resonator method is introduced for measuring the microwave resistance of high temperature superconductor (HTS) thin films. Coupling hole was used in this device for the stimulation of resonator. A  $6\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 8\text{ mm}$  dielectric waveguide and an  $L$  type coupling loop made of roasting silver situating in the section plane of the dielectric waveguide are used for the EM transmitting. This coupling structure is a new attempt for low temperature measurement. The microwave surface resistances ( $R_s$ ) of two YBCO films about 2 inches deposited on MgO substrates are measured.

**Key words** high stability; HTS; roasting silver on ceramic; surface resistance  $R_s$  measurement

高温超导薄膜微波表面电阻 $R_s$ 是设计高温超导微波无源器件不可缺少的参数。目前 $R_s$ 测试方法有圆柱形谐振腔法<sup>[1]</sup>、平行板谐振器法<sup>[2]</sup>、微带线谐振器法<sup>[1,3]</sup>以及介质谐振器法<sup>[4-5]</sup>。其中双蓝宝石介质谐振器法被制定为国际测试标准<sup>[6]</sup>,然而该方法测得的是两片高温超导薄膜 $R_s$ 的平均值,并不能直接得到单片高温超导薄膜的 $R_s$ ,且其理论推导建立在忽略 $\text{TE}_{011}$ 和 $\text{TE}_{013}$ 两种模式径向辐射损耗差异和两种模式使用的蓝宝石柱 $\epsilon_r$ 和 $\tan\delta$ 差异的基础之上。另一种高温超导薄膜 $R_s$ 测试方法是镜像蓝宝石谐振器法<sup>[7-9]</sup>,它最大的优点在于能对单片高温超导薄膜 $R_s$ 进行直接测量;且经过校准测试后,只需要测试一次便可直接算出高温超导薄膜的 $R_s$ 值,特别适合大批量测试。以往的镜像法测试装置均采用同轴线耦合环的方式进行耦合,但由于耦合环通常靠手工焊接,其尺寸难以严格控制,且耦合环较大的微波损

耗将降低谐振腔的 $Q$ 值,影响测试结果。因此,新的测试装置采用耦合孔耦合谐振腔内的电磁能量,并通过在氧化铍陶瓷剖面焙银的新方法实现磁耦合,达到电磁能量传输的目的。由于整个耦合装置结构规则,绝大部分都采用机械加工,尺寸精度较高。因此,与以往的镜像法测试装置相比,新装置的模拟仿真更有实际意义且具有良好的测试重复性。

### 1 镜像法原理

镜像法测试装置如图1所示,采用一端短路,一端开放的截止波导中的同轴蓝宝石进行测量,其工作模式为 $\text{TE}_{011+\delta}$ 模,  $H_\phi=0$ ,腔壁上只有圆周方向的电流,更换短路面并不影响测试头的电磁场分布。因此可以通过测量短路面为不同材料时,测试腔的 $Q$ 值来达到测量HTS薄膜 $R_s$ 的目的。测试腔的无载品质因数为<sup>[7]</sup>:

收稿日期: 2008-01-18; 修回日期: 2008-05-21

基金项目: 国家863计划(TC265-0304)

作者简介: 曾 成(1982-),男,博士生,主要从事高温超导薄膜微波表面电阻测量方面的研究。

$$Q_0 = \frac{1}{A + BR_s} \quad (1)$$

式中  $A$ 、 $B$  为电磁场积分的比值, 只与电磁场的分布即工作模式有关, 腔体确定后  $A$ 、 $B$  即为常数。

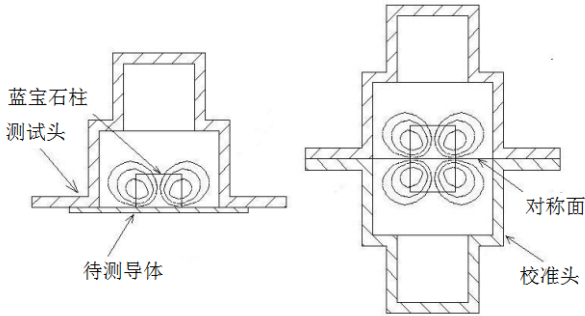


图1 镜像法测试装置图

若用一个与测试头结构完全一样的校准头代替短路面并与测试头对接, 即头对头测试。由于两个头完全对称, 其对称面为磁壁, 可以等效地认为校准头的电阻为零。谐振腔的主模变成了  $TE_{012+2\delta}$ , 且谐振频率不变, 如图1所示。由于校准头与测试头结构相同, 测试头内的电磁场结构并未发生变化, 利用此时测得的谐振腔无载品质因数  $Q_{0H}$  可得到式(1)中的  $A$  值为:

$$A = 1/Q_{0H} \quad (2)$$

得到  $A$  值之后, 再将已知微波表面电阻值  $R_{sAu}$  的金板作为另一块短路面, 即金板测试。此时测试头的工作模式依然是  $TE_{011+\delta}$  模, 工作频率不发生变化, 测试头的无载品质因数为:

$$B = (1/Q_{0Au} - A)/R_{sAu} \quad (3)$$

金板实际上是镀金的黄铜板, 使用金板作为计算  $B$  值短路面的原因是金的性质稳定, 其微波表面电阻不易由于氧化反应而发生变化。金板的微波表面电阻可以由测试与它的制作材料和加工工艺相同镀金圆柱形谐振腔的微波表面电阻值获得, 其值为  $66.7 \text{ m}\Omega$ 。

以上两次测试称为校准过程, 最后再将高温超导薄膜作为测试头的短路面, 测得此时的无载品质因数  $Q_{0HTS}$ , 即可得到其在此测试头谐振频率下的微波表面电阻值为:

$$R_{sHTS} = (1/Q_{0HTS} - A)/B \quad (4)$$

正是由于通过校准后的测试头在测试单片高温超导薄膜  $R_s$  时, 只需要进行一次无载品质因数的测量, 因此该方法在大批量的测试中具有相当大的优势。

## 2 镜像法测试装置的改进

旧有镜像法测试装置结构示意图及等效电路图

如图2所示, 输入输出直接用末端为耦合环的同轴线实现。由于耦合环完全靠手工焊接, 其形状难以精确控制, 耦合环面的法线方向也不易与蓝宝石柱的轴向平行, 因此容易激励起寄生模式。同时这种耦合结构容易产生直接耦合, 使谐振腔的谐振曲线发生畸变, 影响测试结果。另外, 由于谐振腔的功率耗散除了由谐振腔自身金属、蓝宝石、聚四氟乙烯微波损耗引起外, 还包括耦合环的贡献, 而耦合环相对较大的损耗, 不利于提高谐振腔的无载品质因数, 并减少测试不确定度。另外一个较为重要的问题是同轴电缆并非密封器件, 因此整个装置有可能会存在漏气的现象, 从而影响待测高温超导薄膜的性能。

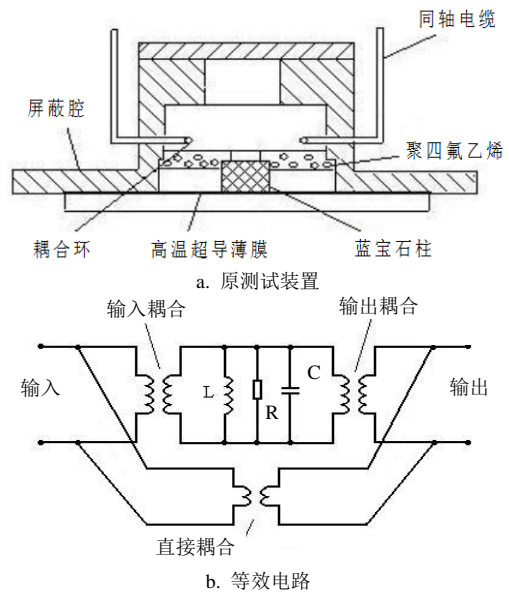


图2 原测试装置及等效电路

为了解决同轴线耦合环带来的上述问题, 本文采用如图3所示的结构作为测试腔耦合装置。与以前镜像法测试装置同轴耦合结构<sup>[10]</sup>相比, 该装置的波导耦合结构加工精度更高, 更易于对耦合量进行模拟仿真。考虑到蓝宝石工作模式为  $TE_{011+\delta}$  模, 靠近谐振腔内壁的磁场方向与  $z$  轴平行, 而波导中的传输主模为  $TE_{10}$  模, 因此耦合小孔采用宽边为  $z$  轴取向的矩形, 窄边尽量小, 但是为了便于机械加工, 窄边的尺寸取  $1 \text{ mm}$ , 并通过改变宽边的尺寸来控制耦合量的大小。该测试装置谐振腔的工作频率为  $12 \text{ GHz}$ , 而截止频率为  $12 \text{ GHz}$  的标准矩形波导尺寸与整个谐振腔相比显得太大, 机械结构上难以实现。因此该结构采用在空气波导中填充介电常数  $\epsilon_r = 7$ ,  $\tan \delta = 0.0006$  陶瓷块的办法来减小波导尺寸, 以达到提高制冷效率的目的。通过这一方式, 波导尺寸宽边和窄边分别减小为  $6 \text{ mm}$  和  $3 \text{ mm}$ 。为了提高无载

品质因数, 本文在测试腔表面镀上一层银。陶瓷的热膨胀系数较低, 因此当测试装置工作在液氮温区时, 陶瓷块与波导内壁将接触更紧密, 不会发生由于陶瓷块松动所造成的谐振曲线抖动甚至畸变的现象。由于陶瓷硬而脆, 不易于机械加工, 如果要将同轴线内导体直接焊接在波导内壁的耦合环方式, 来实现波导到同轴耦合则较为麻烦。本文采用将一整块陶瓷剖开, 通过丝网印刷在截面内焙上一层宽度0.5 mm、厚度仅为50  $\mu\text{m}$ 的L形金属银, 并将密封SMA接头内导体焊接到焙银层上的方式, 来实现波导到同轴的能量传输, 同时达到输入输出接头密封的目的。由于银有良好的导电性和延展性, 因此不需要顾忌在测试的温度循环过程中银层发生断裂。同时, 焙银层的厚度仅为50  $\mu\text{m}$ , 可以不考虑两块陶瓷拼接到一起后, 空气间隙对电磁场传播所带来的影响。正如等效电路图中所示, 虽然在原有谐振腔的基础上, 该耦合结构又引入了两个波导, 但由于波导的反射系数和插入损耗都很小, 因此, 这两个波导的出现不会对测试结果造成负面影响。

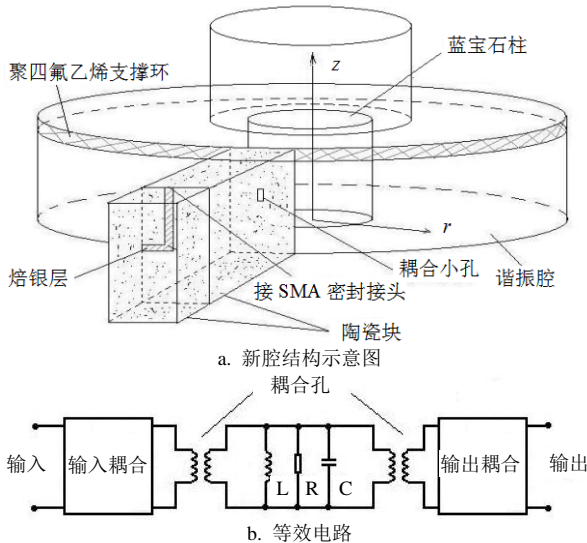


图3 新腔结构示意图及等效电路

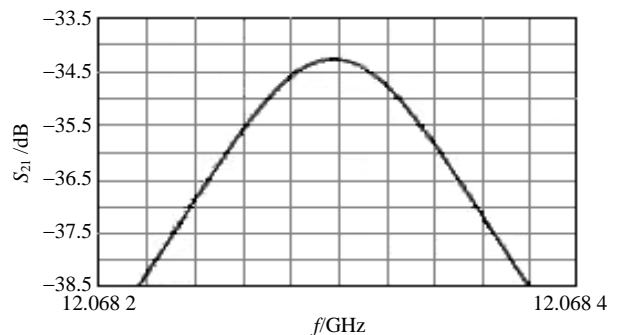
### 3 实测高温超导薄膜 $R_S$

测试装置实物图及测试高温超导薄膜时的谐振曲线如图4所示。头对头测试和金板测试的无载品质因数分别为 $Q_{0H}=131\,479$ ,  $Q_{0Au}=13\,060$ 。表1所示为使用该装置对两片高温超导薄膜样品正面和反面测试的结果。按文中所述的校准方法可得,  $A=7.61 \times 10^{-6}$ ,  $B=1.16 \times 10^{-6}$ 。由于新测试腔的 $Q$ 值在以前的基础上有所提高, 相应的测试腔灵敏度有所改善。由于受到水气影响后, 测试腔的 $Q$ 值会降低, 且高温超导薄膜的性能容易变差。因此在装置安装和测试过程中, 实验室空气的湿度始终保持在30%以下,

并在冷热循环的过程中始终对测试装置充填高纯度氦气。测试系统示意图如图5所示, 在测试过程中矢量网络分析仪AgilentE8363A采用相同的设置: 输入功率 $P_{in}$ 为0 dBm, 中频带宽为100 Hz, 点数points为401, 平滑smoothing为0.75%, 有载 $Q$ 值和 $S$ 参数从矢网上直接读取(随机10次读数取平均值), 谐振曲线的每次扫描时间为3.6 s。从谐振曲线的形状可以得知测试头的工作模式并未受到寄生模式或者直接耦合的干扰。镜像法测试装置对同一高温超导薄膜微波表面电阻进行反复测试, 所得的测试数据如表2所示。在测试过程中, 一共进行了6次从室温293 K降温到77 K, 再从77 K升温到293 K的温度循环过程, 每经一次温度循环测试一次 $R_{SHRS}$ 。每次测试时随机读取10组 $S_{11}$ 、 $S_{22}$ 和 $Q_L$ 数据, 根据各组数据计算得到每组的无载品质因数 $Q_0$ , 最后再取这10组 $Q_0$ 的平均值。



a. 测试腔实物



b. 测试曲线

图4 测试腔实物及测试曲线

表1 两片高温超导薄膜样品测试结果

样品	$Q_0$	$R_S / \text{m}\Omega$ (77 K, 10 GHz)
1#正面	118 453	0.50
1#反面	120 291	0.42
2#正面	122 148	0.35
2#反面	121 346	0.38

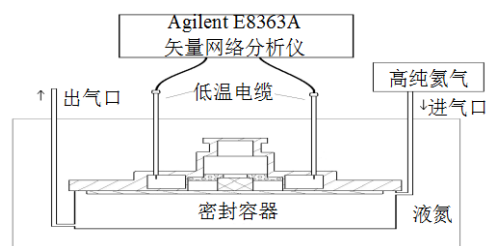


图5 测试系统示意图

表2 镜像法测试装置的重复性测试

No.	$Q_0$	$R_{SHTS}/m\Omega$
1	121 346	0.380
2	121 217	0.390
3	121 491	0.370
4	121 396	0.380
5	121 498	0.370
6	121 696	0.370
$R_{SHTS}$ 平均值		0.380
$R_{SHTS}$ 标准偏差		0.009
$R_{SHTS}$ 相对标准偏差/(%)		2.400

## 4 结 论

本文采用在波导管内填充陶瓷介质,并在陶瓷表面焙银作为耦合环的新耦合方式,对镜像法测试装置进行了改进。从对高温超导薄膜样品 $R_s$ 测试结果可知,在液氮温区至常温跨度超过200 K的温度范围内,这种新的陶瓷表面焙银耦合形式切实可行。改进后的测试腔易于仿真,结构紧凑,谐振腔不会受液氮沸腾产生的振动所导致谐振频率或者 $Q$ 值的不稳定。特别是由于耦合结构几乎完全由机械加工控制,可以保证耦合孔宽边与蓝宝石轴向的平行度,不存在使用耦合环时由于环法线方向与蓝宝石轴向不平行而引起的杂模耦合的问题。并且从减小谐振腔损耗方面来看,耦合孔比耦合环更具优势。由于新测试腔的尺寸和耦合结构发生了变化,与原测试腔 $Q$ 值相比<sup>[4]</sup>,新测试腔的 $Q$ 值高了一倍,大大降低了测试的不确定度。

### 参 考 文 献

[1] WILKER C, SHEN Z Y, PANG P, et al. 5 GHz high-temperature-superconductor resonators with high  $Q$  and low power dependence up to 90 K[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1991, 39(9): 1462-1467.

[2] TABER R C. A parallel plate resonator technique for microwave loss measurements on superconductors[J]. Rev Sci Instrum, 1990, 61(8): 2200-2206.

[3] YOSHITAKE T, TSUGE H. Effects of microstructures on microwave properties in Y-Ba-Cu-O microstrip resonators[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 1995, 5(2): 2571-2574.

[4] SHEN Z Y, WILKER C, PANG P, et al. High  $T_c$  superconductor sapphire microwave resonator with extremely high  $Q$ -values up to 90 K[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1992, 40(112): 2424-2432.

[5] HASHIMOTO T, KOBAYASHI Y. Two sapphire rod resonator method to measure the surface resistance of high- $T_c$  superconductor films[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2004, 3(5): 681-688.

[6] IEC. International Standard IEC 61788-7, Part 7: Electronic characteristic measurements-surface resistance of superconductors at microwave frequencies[S]. 2006.

[7] LUO Zheng-xiang, YANG Kai, LU Jian, et al. Sapphire resonator probe for accurate characterization of microwave surface resistance of high  $T_c$  superconductive thin films[J]. Chinese Journal of Temperature Physics, 1998, 20(4): 311-315.

[8] ZHANG Ying-min, LUO Zheng-xiang, YANG Kai, et al. Measurement method of microwave surface resistance of high  $T_c$  superconductive thin films[J]. Physica C, 2003, 2(4): 473-476.

[9] LU Jian. A  $TE_{011+\delta}$  mode sapphire resonator probe for accurate characterization of microwave surface resistance of hts thin films[C]//ICCS/94. [S.l.]: IEEE, 1994: 959-963.

[10] 何建, 罗正祥, 张其劭. 两种测试高温超导薄膜微波表面电阻方法的讨论[J]. 低温与超导, 2005, 33(1): 53-56.

HE Jian, LUO Zheng-xiang, ZHANG Qi-shao. Two kinds of measurement method of microwave surface resistance of high  $T_c$  superconductive thin films[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2005, 33(1): 53-56.

编辑 黄 莘