

高温超导薄膜微波表面电阻测试方法的改进

何建¹, 罗正祥²

(1. 中国民航飞行学院航空工程学院 四川 广汉 618307; 2. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

【摘要】介绍了一种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 $TE_{011+\delta}$ 谐振模式的介质谐振器, 在77 K时, 利用测量介质谐振器的 Q 值得到单片高温超导薄膜的微波表面电阻 R_s 。分析了其耦合装置对校准物理模型的影响, 通过改进耦合装置可提高系统测试的准确度。该系统与前三代测试系统进行比较, 其测试准确度有明显地提高。

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 TN015 文献标识码 A

Improvement of the Testing Method of Microwave Surface Resistance of High T_c Superconductive Thin Films

HE Jian¹, LUO Zheng-xiang²

(1. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China Guanghan Sichuan 618307;

2. School of Opto-Electronic Information, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract A kind of High T_c superconductive thin film microwave surface resistance test system around 12 GHz is described in this paper. The surface resistance of a single piece of high T_c superconductive thin film can be measured by a sapphire resonator with $TE_{011+\delta}$ mode non-destructively, at 77 K. By measuring the value of the resonator's quality factor, the surface resistance of testing sample can be also determined. And the influence of coupling device on calibrating physical model is also analyzed in this paper. Then testing accuracy of the system can be raised by improving coupling device. The test system is compared with former generations, and the testing accuracy is raised obviously.

Key words high temperature superconductive thin film; microwave surface resistance; dielectric resonator; quality factor

高温超导薄膜微波器件由于其优越的性能, 广泛应用在微波通信领域。高温超导薄膜的微波表面电阻 R_s 是衡量薄膜质量的一个重要指标。因此, 怎样更准确的测量高温超导薄膜的微波表面电阻 R_s , 就显得尤为重要。目前, 国际上通用的方法是作为国际标准的双谐振器法。镜像型蓝宝石介质谐振器法在校准时将腔壁损耗考虑进去, 测试准确度比较高。同时, 还具有单片、批量无损伤测试等优点。

1 原理^[1-4]

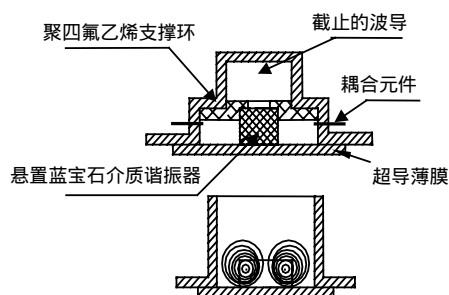


图1 蓝宝石介质谐振器结构图

镜像型蓝宝石介质谐振器法的测试结构示意图如图1所示。它是利用一端短路, 一端开放的截止波导中的同轴蓝宝石介质谐振器进行测量, 其工作模式为 $TE_{011+\delta}$, 它的 $H_{\theta}=0$, 腔壁上只有圆周方向的电流, 因而可以利用更换盖板, 通过测量引入高温超导膜后谐振腔的品质因数的变化来测得薄膜的表面电阻 R_s 。

通过理论推导, 高温超导膜的微波表面电阻 R_s 与介质谐振器的固有品质因数的倒数呈线性关系:

$$1/Q_0 = A + BR_s \quad (1)$$

式中 结构常数 A 、 B 是电磁场积分的比值, 只与电磁场的分布(即

模式)有关。所以腔体确定了, A 、 B 的值就是定值。常数 A 、 B 可以分别通过“零电阻”校准和银板校准得出。因此, 只要测出加载了高温超导薄膜的谐振腔的品质因数即可得出薄膜的表面电阻。

2 分析

在进行零电阻面校准时是以校准头和测试传感头完全一致, 使其接触面成为理想磁壁, 从而该面上的电阻是零为理论依据的。但是在实际中不可能获得如此对称的物理模型, 其主要原因是: (1) 校准头和测试传感头上各有一个蓝宝石介质谐振器, 在实际使用中两块晶体总存在一定的差异, 包括物理尺寸与电磁特性。(2) 在测试传感头上必须有外电路耦合装置, 而校准头上没有, 二者在结构上不对称。

由于存在以上的原因, 使得“零电阻”面很难真正成为理想磁壁, 就给测量带来了误差。因而测量系统中的一个关键问题就是镜像对称校准问题, 它直接关系到对样品测试的准确度。

采用蓝宝石晶体是因为其介电常数较大, 而损耗角正切较小, 可将能量集中于蓝宝石区域内, 这样谐振腔的品质因数可以做得很高, 使其具有很高的测试灵敏度。为了减小蓝宝石晶体对校准物理模型的影响, 从同一块蓝宝石单晶材料上切割出一根长的介质棒, 介质棒的轴心与蓝宝石晶体的 C 轴平行。然后按所需尺寸要求切割出多个蓝宝石晶体, 并用同样的技术抛光, 这样就能保证蓝宝石晶体电磁参数和物理尺寸的基本一致性。因此在校准过程中, 蓝宝石的电磁参数和物理尺寸对镜像物理模型的影响非常小, 对零电阻表面的影响极其微弱, 在本装置中完全可以不计。另一方面, 由于在测试传感头上有供输入和输出的耦合装置, 而校准头上没有, 这样造成不对称。耦合装置的引入必然会在谐振腔中引入新的导纳 Y_L 。

$$Y_L = G_L + jB_L \quad (2)$$

式中 B_L 为电纳, 它的引入会使驻波相位发生位移, 整个谐振装置的谐振频率 f_0 发生变化; G_L 为电导, 它的引入会使品质因数 Q_0 发生变化。

在如图2所示装置中, 设上下两个腔体和无耦合装置时整个装置的谐振频率、品质因数分别是 f_{0F} , Q_{0F} , f_{0U} , Q_{0U} , f_0 , Q_0 。由于在上腔体(传感头)中加入了耦合装置, B_L 的引入必然会出现 $f_{0F} \neq f_{0U} \neq f_0$ 的情况。但是当耦合相当弱时, 三者相差就很小, 基本上可以认为 $f_{0F} \approx f_{0U} \approx f_0$ 。

蓝宝石的损耗角正切 $\tan\delta(\omega)$ 是频率的函数。但是又因为蓝宝石的损耗角正切本身非常小, 而 δ 的变化也很小, 所以损耗角正切的变化就更小, 对品质因数 Q_0 几乎没有影响。但是 G_L 会对品质因数 Q_0 产生影响。从严格定义上讲, 传感腔、校准腔的内部固有损耗包括腔壁损耗、蓝宝石介质损耗和聚四氟乙烯介质损耗。由于交界面为“零电阻”, 故无损耗。因此, 在没有耦合装置时, 传感腔、校准腔的内部固有损耗的大小是相等的。即: $Q_{0U} = Q_0 = Q_{0F}$ 。但实际上, 耦合装置的引入使传感腔的结构发生变化, 无论是耦合孔还是耦合环耦合, 除外负载会带来一部分损耗外, 耦合孔、耦合环本身由于其结构也会带来一部分损耗(耦合孔壁、耦合环及其焊接部分等都会带来损耗)。但这部分损耗不是由外负载引起的, 它应包含在谐振腔内部损耗 P_d 中。于是出现了有、无耦合时 P_d 的不一样, 相应的 Q_0 也不一样。因此, 当有耦合装置时, 就出现: $Q_{0U} < Q_0 < Q_{0F}$ 。

由于“零电阻”校准时, 校准腔的作用相当于一个“零电阻”平面, 传感腔的实际固有品质因数应是 Q_{0U} 。而测量时得到的是整个校准装置的 Q_0 值, 所以, 采用的 Q_0 值就比实际的偏差, 从而使得求出的 A 值出现误差, 最终使得测量出的 R_s 值也有较大的误差。所以必须尽量减小耦合装置的影响, 尽可能地降低耦合, 以保证测试精确度和校准物理模型的准确性。

3 改进及测试结果比较

第1代谐振器采用轴向同轴耦合环。该方式两耦合环之间存在其他非谐振波型直接耦合的缺点, 使谐振曲线发生畸变。第2代谐振器改轴向耦合为径向耦合环耦合, 同时将耦合位置相对称面靠近, 减小了直接耦合。但由于仍采用耦合环耦合, 耦合环带来的损耗较大, 降低了 Q 值, 同时影响了校准模型的对称性。第3代谐振器通过同轴-波导转换, 在波导壁和谐振腔壁开小孔耦合, 改环耦合为孔耦合。但由于中间多了同轴

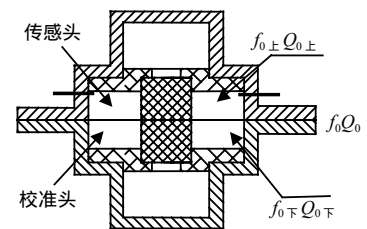


图2 谐振腔示意图

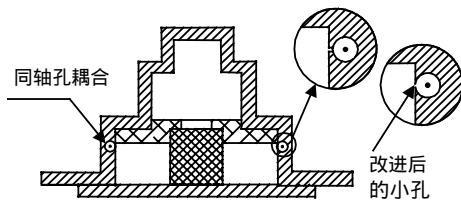


图3 改进后的谐振器示意图

-波导转换,仍不是很理想。

改进后的第4代测试腔结构如图3所示。采用孔耦合方式,耦合孔的位置向零电阻表面方向靠近,以减小直接耦合。在测试腔外侧,平行于零电阻平面的方向上平行钻两个孔,在孔中心放置细的圆柱导体,并在一端短路。即形成以孔壁为外导体,细的圆柱导体为内导体的终端短路的同轴电缆。在同轴孔壁和谐振腔壁间开小孔进行磁场耦合。同时,设计终端短路面与耦合孔后中心的距离为 $\lambda/2$ 的整数倍,使得耦合孔中心处于磁场最强点。进一步,同轴孔中心向谐振腔壁靠近,使同轴孔稍微冲破谐振腔壁,从而获得一个孔壁厚度近似为零的耦合小孔。于是,进一步降低了耦合系数,减小了耦合装置所带来的 G_L 的影响,测试准确度得到进一步的提高。

对改进后的蓝宝石介质谐振器进行“零电阻”校准测试,将校准测试结果与前面几代的测试结果进行比较,结果如表1所示。根据表1,第4代测试腔的耦合系数 β 比第2代要低2个数量级,比第3代低1个数量级。这说明通过改进耦合装置达到了降低耦合系数的要求,测试装置具备更为准确的物理模型,其测试准确度和精度也得到提高。

表1 “零电阻”校准测试结果

	P_{in}/dBm	f_0/GHz	P_{out}/dBm	Q_L	β	Q_0
第4代	10	12.049 808	-61.63	111 769	0.000 131	111 798
	10	12.049 807	-61.65	111 686	0.000 131	111 715
	10	12.049 807	-61.66	111 407	0.000 131	111 436
	10	12.049 807	-61.66	111 645	0.000 131	111 673
	10	12.049 808	-35.69	111 345	0.000 130	111 374
	10	12.049807	-35.63	111 655	0.000 131	111 684
第2代	0	11.977 857	-37.2	103 962	0.011	106 269
	0	11.977 858	-37.2	103 746	0.011	106 040
	0	11.977 857	-37.2	103 834	0.011	106132
	0	11.977 857	-37.2	103 835	0.011	106163
	0	11.977856	-37.2	103 846	0.011	106 151
	0	11.977 857	-37.2	103 785	0.011	106 089
第3代	10	17.136 861	-37.33	47 987	0.006 89	48 648
	10	17.136 855	-37.33	47 963	0.006 89	48 625
	10	17.136850	-37.33	48 011	0.006 89	48 672
	10	17.136 850	-37.32	48 044	0.006 89	48 707
	10	17.136 848	-37.31	48 026	0.006 89	48 690
	10	17.136 846	-37.3	48 109	0.006 89	48 775

参 考 文 献

- [1] 张映敏, 罗正祥, 羊 恺, 等. 高温超导薄膜微波表面电阻测试方法[J]. 电子科技大学学报, 2001, 30(6): 633-637.
- [2] 刘 泥. 高温超导微波表面电阻的测量: [硕士学位论文][D]. 成都: 电子科技大学, 2002.
- [3] 黎 涛. 高温超导薄膜微波表面电阻的测量: [硕士学位论文][D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- [4] 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[J]. 低温物理学报, 1998, 20(4): 311-315.

编辑 漆 蓉