

准光学谐振腔测高温超导薄膜表面电阻

崔芙蓉¹⁾ 罗正祥²⁾ 赖声礼¹⁾

¹⁾华南理工大学电子与通信工程系, 广东, 广州, 510640

²⁾电子科技大学微波测试中心, 四川, 成都, 610054

0511.2

摘要 研制了工作在 94GHz 的两球面镜组成的高温超导表面电阻及其分布的准光学谐振腔测试系统, 腔体的 Q 值高达 1.4×10^5 , 高斯波束的束腰半径为 2.51mm. 此方法具有不损伤超导膜片、灵敏度高, 并能检测大面积超导薄膜表面电阻均匀性的优点.

关键词 准光学谐振腔, 高温超导薄膜, 表面电阻.

QUASI-OPTICAL RESONATOR FOR MEASURING SURFACE RESISTANCE OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR

CUI Fu-Rong¹⁾ LUO Zheng-Xiang²⁾ LAI Sheng-Li¹⁾

¹⁾Department of Electronic and Communication Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

²⁾Microwave Test Center, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract A quasi-optical resonator system working at 94 GHz for measuring superconductor surface resistance and its distribution using two spherical mirrors was developed. The quality factor Q of the resonator is higher than 1.4×10^5 , the radius of Gauss beam waist is 2.51mm. The method has advantages of being nondestructive and high sensitivity. The surface resistance uniformity of large-area sample can also be measured by this system.

Key words quasi-optical resonator, high temperature superconductor film, surface resistance.

引言

随着高温超导体在微波、毫米波领域的广泛应用, 高温超导无源器件具备噪声低、功耗小等常规器件无法比拟的优异性能, 超导薄膜的好坏直接关系到器件性能的优劣, 因此制备高质量的超导薄膜, 精确测量表面电阻及其分布的工作越来越显得迫切和重要. 目前国内外有许多测试高温超导薄膜表面电阻的测试方法, 如蓝宝石谐振器法^[1~2]、平行板谐振器法^[3~4]等, 但是这些测试方法都只能测量超导表面电阻的平均值, 并不能获得薄膜表面电阻各处的分布信息.

本文设计和制作了工作在 94GHz 下的开式谐振腔测试装置, 准光学谐振腔由两球面镜组成, 其中一球面镜与移动装置相连, 镜面上有耦合输入输出孔. 通过测量空腔和加载高温超导薄膜样品后腔体 Q 值的变化, 测得高温超导薄膜的表面电阻. 谐振腔中高斯波束束腰半径在样品表面只有 2.51mm, 调节移动装置, 可

实现对大面积的高温超导薄膜的扫描测试, 因此可以测得大面积超导薄膜不同区域中表面电阻 R_s 的值.

1 测试原理

图 1 为准光学谐振腔示意图, 图 1(a) 为两个球面镜组成的对称谐振腔, 对称腔的腔长是半对称腔长度的两倍, 图 1(b) 为球面镜和平面镜组成的半对称谐振腔, 平面镜即是超导样品.

在测试系统中调节移动装置, 使两球面镜光轴重合, 谐振腔的品质因数可表示为:

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_{\text{aim}}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}, \quad (1)$$

式(1)中 Q_{aim} 是球面镜镜面损耗, Q_c 是耦合损耗, Q_d 是腔体的衍射损耗, 衍射损耗引起的 Q 值超过 10^7 , 可以忽略不计^[5].

将超导样品放置在对称腔的中心处, 超导薄膜与一球面镜组成半对称准光学谐振腔, 谐振腔中主模是

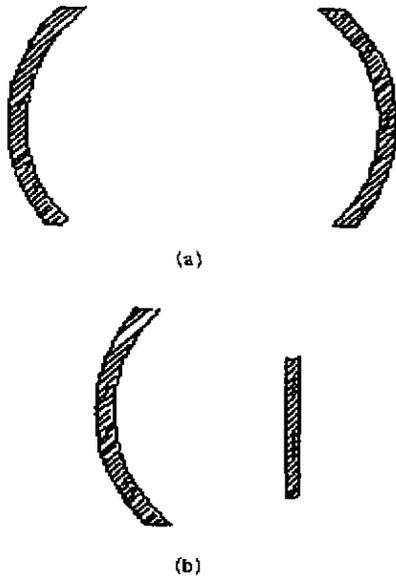


图1 准光学谐振腔示意图

(a) 两个球面镜组成的对称谐振腔

(b) 球面镜和平面镜组成的半对称谐振腔

Fig. 1 The schematic of quasi-optical resonator

(a) the symmetrical resonator consisting of two spherical mirrors

(b) the half-symmetrical resonator consisting of a spherical mirror and a plane mirror

TEM_{00q}模, 磁场在超导样品表面有最大值, 腔体的损耗主要体现在超导样品表面, 因而测试灵敏度提高. 加载超导样品的谐振腔的品质因数为

$$\frac{1}{Q_i} = \frac{1}{Q'} + \frac{1}{Q_{ohm}'} + \frac{1}{Q_{HTS}}, \quad (2)$$

式(2)中 Q_{HTS} 是高温超导薄膜引起的损耗.

高温超导薄膜样品微扰谐振腔时, 腔体内的场结构未发生改变, 而且开式谐振腔的场分布是奇对称的^[4], 半对称谐振腔内场结构与对称腔内相同, 由耦合装置可知

$$Q_c = Q_c', \quad (3)$$

对称谐振腔由欧姆损耗引起的 Q 值为

$$Q_{ohm} = 2\pi f \frac{W}{P_d}, \quad (4)$$

式(4)中 W 是对称谐振腔存贮的总能量, f 是对称腔的谐振频率, P_d 是镜面损耗的功率.

半对称球形谐振腔的欧姆损耗引起的 Q 值为

$$Q_{ohm}' = 2\pi f \frac{W'}{P_d'}, \quad (5)$$

式(5)中 W' 、 P_d' 分别是半对称谐振腔中存贮的总能量和镜面金属损耗功率. f' 是半对称腔的谐振频率. 我们

设计制作的两个球面镜的表面形状、光洁度几乎完全相同, 并且使对称腔和半对称腔工作在同一谐振频率 94GHz 下, 因而

$$P_d = 2P_d' = 2 \cdot \frac{r_s}{2} \iint |H_t|^2 ds, \quad (6)$$

式(6)中 r_s 是金属银的表面电阻, H_t 是磁场在镜面上的切向分量.

$$f = f', \quad (7)$$

$$W = 2W' = 2 \iiint |H|^2 d\nu, \quad (8)$$

式(8)中 H 是半对称腔中的磁场分量, 因此可知

$$Q_{ohm} = Q_{ohm}'. \quad (9)$$

综上所述, 可得

$$\frac{1}{Q_{HTS}} = \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0}, \quad (10)$$

而

$$Q_{HTS} = 2\pi f \frac{W}{P_{d_{HTS}}} = 2\pi f \frac{\frac{\mu_0}{2} \iiint |H|^2 d\nu}{\frac{R_{s_{HTS}}}{2} \iint |H_t|^2 ds}, \quad (11)$$

式(11)中 $P_{d_{HTS}}$ 是超导薄膜引起的损耗.

将式(11)代入式(10)可得超导薄膜表面电阻 R_s 表达式为

$$R_{s_{HTS}} = \frac{2\pi f(Q_0 - Q_L)\mu_0 \iiint |H|^2 d\nu}{Q_0 Q_L \iint |H_t|^2 ds}, \quad (12)$$

准光学谐振腔的磁场分量表达式如下^[6]:

$$H_x = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{\omega_0}{\omega} \exp\left(-\frac{\rho^2}{a^2}\right)$$

$$\left[\cos\theta - \frac{2}{k^2 a_0^2 \omega} \cos(\theta - \varphi) + \frac{3x^2 + y^2}{k^2 a_0^2 \omega^2} \cos(\theta - 2\varphi) \right]$$

$$H_y = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{2xy}{k^2 a_0^2 \omega^3} \exp\left(-\frac{\rho^2}{a^2}\right) \cos(\theta - 2\varphi)$$

$$H_z = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{2x}{k\omega a^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{a^2}\right)$$

$$\left[\sin(\theta - \varphi) - \frac{2}{k\omega a^2} \sin(\theta - 2\varphi) \right] \quad (13)$$

式(13)中:

$$\theta = kz + \frac{k\rho^2}{2R(z)} - \varphi, \quad \varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right),$$

$$k = 2\pi/\lambda, \quad \rho^2 = x^2 + y^2;$$

式(13)中 k 是传播常数, ω 是轴向 z 处横截面上高斯波束束腰半径, $R(z)$ 是轴上 z 处等相位面曲率半径, ω_0 是轴向 z_0 处高斯波束束腰半径, φ 是附加相移。

测量空腔和加载超导样品的腔体的 Q 值, 将以上场分量代入式(12)进行数值积分, 可获得超导表面电阻 R_s 。在水平方向上微调移动装置, 高斯波束照射在样品的不同位置上, 测得不同点处腔体的 Q 值, 因此可获得整块样品的 R_s 分布。

2 设计与制作

球形开式谐振腔是用来测量高温超导表面电阻及其分布的, 在腔体的设计中, 我们考虑了以下四方面的因素:

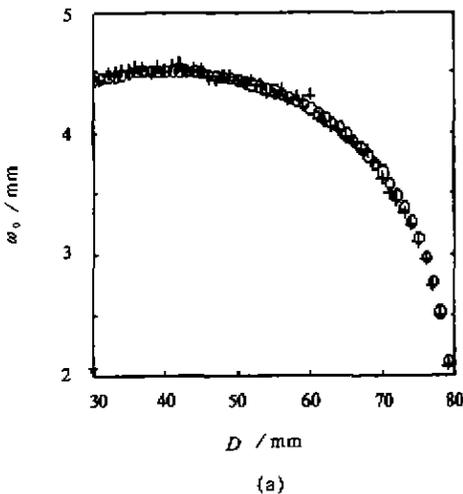
- (1) 谐振腔的谐振态是稳定的。
- (2) 高斯波束的束腰半径要尽可能的小, 从而提高分辨率。
- (3) 非涅尔系数大。
- (4) 谐振腔的品质因数要尽可能的高。

对于对称谐振腔, 束腰半径为

$$\omega_0^2 = \left\{ \frac{D(2R - D)}{4} \right\}^{1/2}, \quad (14)$$

式(14)中 D 是两球面镜的镜间距, R 是镜面的曲率半径。

谐振腔的非涅尔系数



(a)

$$N = \frac{\alpha^2}{\lambda D}, \quad (15)$$

式(15)中 α 是球面镜的口面直径。

对称谐振腔的稳定条件是^[6]

$$0 < \left(1 - \frac{D}{R} \right)^2 < 1. \quad (16)$$

开式谐振腔的谐振频率是^[7-8]

$$f = \frac{c}{2\pi D} \left[(q + 1)\pi + \arctan \left(\frac{D}{R - D} \right)^{1/2} \right], \quad (17)$$

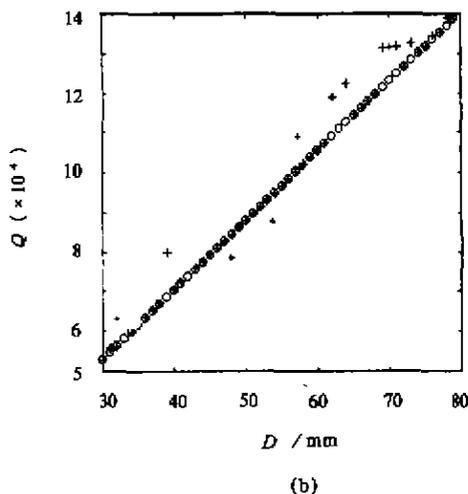
式(17)中 q 是谐振模式 TEM_{0q} 的轴向模式数。在式(17)中未考虑电磁场矢量特性、镜面有限电导率、镜面形状的因素引起的频率变化, 在分析了以上因素的影响后谐振频率的公式为

$$f = \frac{c}{2\pi D} \left[(q + 1) - \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{D}{R - D} \right) + \frac{5D}{8\pi k R (R - D)} - \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{1}{kR} \right) - \frac{d}{\pi k} \left(\frac{2R - D}{R} \right) \right], \quad (18)$$

在谐振频率时, 谐振腔的谐振长度为

$$D = \frac{c}{2f} \left[(q + 1) + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{D}{R - D} \right) + \frac{5D}{8\pi k R (R - D)} - \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{1}{kR} \right) - \frac{d}{\pi k} \left(\frac{2R - D}{R} \right) \right]. \quad (19)$$

谐振腔的品质因数 Q 表示为



(b)

图 2 腔体的品质因数和 Gauss 束腰半径随腔体长度变化的理论和测试曲线图

(○表示实验数据, ×表示理论计算数据)

(a) 准光学腔的 Gauss 束腰半径随腔体长度的变化曲线

(b) 准光学腔的品质因数随腔体长度的变化曲线

Fig. 2 The radius of Gauss beam waist and quality factor Q versus the distance between the two spherical mirrors. (○ experimental data, × computational result).

(a) the radius of Gauss beam waist versus the distance between the mirrors.

(b) the quality factor versus the distance between the mirrors

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{2S}{D} + \frac{10.9 \exp(-4.94N)\lambda}{3\pi D}, \quad (20)$$

式(20)中 S 是球面镜镜面金属的趋肤深度。

式(16)、(17)、(18)、(19)、(20) 是设计球面镜的曲率半径和谐振腔的腔长的依据。由图 2 可见,腔体的 Q 值随着谐振腔的长度的增大而升高,但高斯束腰半径也同时增大。我们的目的是获得高 Q 值、小 ω_c 的腔体。进行优化设计后,选取球面镜的曲率半径 $R=40\text{mm}$,口面直径 $a=78\text{mm}$,腔体的长度 $D_{\text{腔}}=78\text{mm}$ 。球面镜的中央设计了两个孔径为 1mm 的耦合小孔^[9],如图 3 所示,两小孔间距为 4.73mm ,矩形波导传输的 TE_{10} 波分别由耦合孔耦合输入和输出。球面镜的基体材料是微晶玻璃,表面镀上了厚度为 2μ 的银膜,表面光洁度达 $\nabla 14$ 。

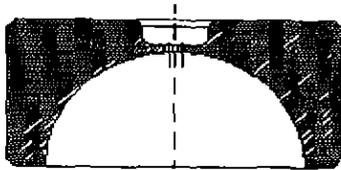


图 3 有耦合孔的球面镜示意图
Fig. 3 The schematic diagram of spherical mirror with coupling hole

3 测试系统

利用通过式谐振腔测试系统测量,分别获得对称谐振腔和加载高温超导薄膜的半对称谐振腔的谐振曲线,对于谐振曲线,采用 3dB 带宽 Δf 求谐振器的有载品质因数 Q_L 。

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (21)$$

式(21)中 f_0 是谐振频率, f_1 、 f_2 是谐振曲线上半功率点的频率, Q_L 是谐振器固有损耗和外部损耗总和所对应的品质因数,称为有载品质因数。对于通过式谐振腔

$$Q_0 = Q_L(1 + \beta_1 + \beta_2), \quad (22)$$

式(22)中 β_1 和 β_2 分别为波导和谐振腔的耦合系数,在此测试系统中近似地认为谐振腔的输入和输出端口基本上是对称的,于是

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta, \quad (23)$$

$$Q_0 = Q_L(1 + 2\beta). \quad (24)$$

把通过式谐振腔看成是双口网络,可得到耦合参数和谐振腔的插入损耗之间的关系式

$$S_{21} = \frac{2\sqrt{\beta_1\beta_2}}{1 + \beta_1 + \beta_2}, \quad (25)$$

由式(23)可知

$$\beta = \frac{S_{21}}{1 - 2S_{21}}, \quad (26)$$

在所研究的开式腔中,波导与腔体的耦合是欠耦合,则 $\beta \leq 1$,因此

$$Q_0 = Q_L. \quad (27)$$

测试系统的框图如图 4 所示。频率综合扫频源出来的信号被倍频器倍频后,经过精密衰减器,波导中传输的 TE_{10} 波通过耦合小孔进入光学谐振腔;调节移动装置,使球面镜严格同轴;调节两镜面的长度使其谐振,经谐振腔耦合出来的信号进入混频器混频,最后进入标量网络分析仪,得出谐振曲线,从而测得空腔体的 Q 值。常温下的测试结果如表 1 所示。

调节移动装置,放置超导薄膜样品,调节样品与球面镜距离是对称距离的一半,测出加载样品后谐振腔

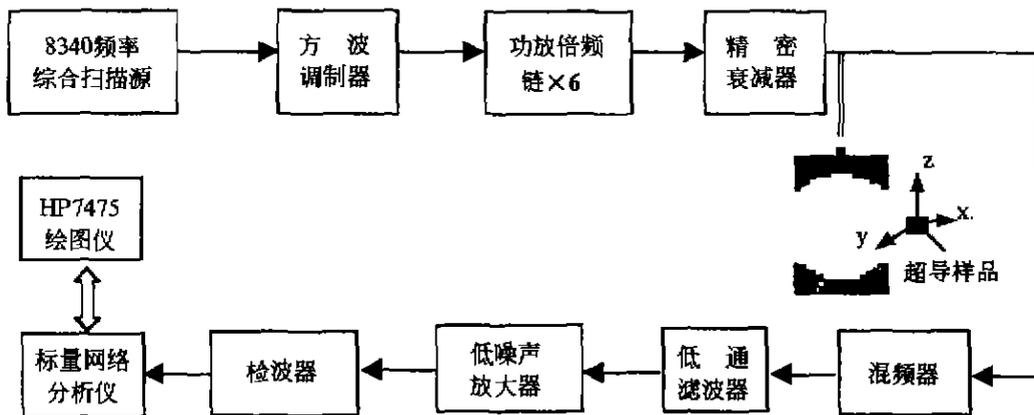


图 4 准光学腔测高温超导薄膜表面电阻的测试框图
Fig. 4 Quasi-optical resonator measurement setup for R_s of high T_c superconducting film

的 Q 值. 微调移动支架水平方向面上的位移量, 使高斯光斑打在样品表面上不同点处, 测出不同点时腔体的 Q 值, 因而可获得超导薄膜样品的 R_s 分布.

表 1 金属的表面电阻在常温下的数据结果
Table 1 The results of metal surface resistance at room temperature

样 品	Q	Q_0	$R_s/\mu\Omega$
金膜	1.1E5	8.7E4	97.01
铜膜	1.3E5	9.9E4	112.31
金膜	1.2E5	9.5E4	105.30

4 结 语

本文优化设计并制作了工作在 94GHz 频率下, 准光学谐振测高温超导及其表面电阻分布的测试装置. 腔体的品质因数高达 $1.4 \cdot 10^5$, 高斯波束的束腰半径为 2.5mm. 在常温下对金属样品的表面电阻 R_s 进行了测试, 验证了实验方案的可行性.

REFERENCES

[1] Holsten W L, Shen Z Y. Power handling capability of

large area HTS thin film at microwave frequency, *5th International Symposium on Superconductivity*, 1993, 1: 16-19

- [2] Jerzy K. Surface resistance measurement of HTS films by means of sapphire dielectric resonators, *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, 1993, 3(9): 2034-2047
- [3] Taber R C. A parallel plate resonator technique for microwave loss measurements on superconductors, *Rev. Sci. Instrument*, 1990, 6: 2200-2206
- [4] Reible S A, Wilker C W. Parallel plate resonator for accurate RF surface loss measurements, *IEEE Trans on Mag*, 1991, 27(2): 2813-2816
- [5] Boyd G D, Gordon J P. Fabry-Perot and open resonators at microwave and millimeter wave frequencies, 2-300GHz, *Bell Sys. Tech. J.*, 1961, 40: 489-493
- [6] Cullen A L, Yu P K. Complex source-point theory of the electromagnetic open resonator, *Proc Roy. Soc. Lond A.*, 1979, 366: 151-171
- [7] FANG Hong-Lie. *Optical Resonator*. Beijing: Science Press (方洪烈, 光学谐振腔, 北京: 科学出版社), 1981, 7-10
- [8] Kogelinkk H. Laser beams and resonators, *Proc. IEEE.*, 1966, 54: 1312-1329
- [9] Luck Yu. High-order azimuthal modes in the open resonators. *Electron Letters*, 1983, 19(14): 539-541