

# 利用金属环聚焦的HTS薄膜 $R_s$ 分布测试法的研究

陈柳, 曾成, 褚青如, 张洁, 补世荣, 宁俊松

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

**【摘要】**介绍了一种测试高温超导薄膜微波表面电阻分布的新方法。该方法利用镜像法相关原理,通过引入金属环实现介质谐振器和腔体的能量汇聚,解决了高温超导薄膜微波表面电阻的分布测试通用性与高分辨率不兼容的问题。根据该方法研制了工作在32 GHz的频率下,工作模式为 $TE_{012+\delta}$ 的测试装置,其分辨率为直径5 mm,面积 $19.6 \text{ mm}^2$ 的圆面。测试装置对一片两英寸YBCO/LAO/YBCO超导薄膜样品进行了13个点的表面电阻分布测试。

**关键词** 高温超导; 分布测试; 金属环; 分辨率

中图分类号 TN98

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.01.021

## Study of Distribution Test Method of HTS Thin Film's $R_s$ Using Metal Ring for Focusing

CHEN Liu, ZENG Cheng, CHU Qing-ru, ZHANG Jie, BU Shi-rong, and NING Jun-song

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new method for testing the distribution of the microwave surface resistance ( $R_s$ ) of high temperature superconductor (HTS) is introduced in this paper. By using the mirror method and its relevant principles, the energy convergence of dielectric resonator and cavity is achieved and the incompatible problem between the versatility and high resolution of  $R_s$  of HTS thin film is solved through a metal ring. A testing device working at 32 GHz with  $TE_{012+\delta}$  mode is developed according to this method. The resolution of the device can reach a circle with 5 mm in diameter and  $19.6 \text{ mm}^2$  in area. In this paper, the distribution test of  $R_s$  with thirteen points is conducted on a piece of two inch YBCO/LAO/YBCO superconductor thin film sample by this new testing device.

**Key words** HTS; measure distribution; metal ring; resolution

高温超导(HTS)薄膜微波表面电阻 $R_s$ 是高温超导材料非常重要的特性参数,然而高温超导薄膜表面电阻分布并不均匀,故需要对HTS微波表面电阻的分布进行测量,以便更好地评估HTS薄膜的特性,设计高性能的超导微波器件。

目前高温超导薄膜微波表面电阻分布测试主要有双介质谐振器法、准光学谐振腔法<sup>[1]</sup>。双介质谐振器法已经成为我国的国家测试标准<sup>[2]</sup>,然而这种方法并不能直接得到薄膜微波表面电阻分布。国外研究人员为了能够测量薄膜微波表面电阻的分布,通过对双端短路介质谐振器法进行了一定程度的改进,使其测量分辨率达到了直径16 mm的圆面<sup>[3]</sup>。另外一种可以对微波表面电阻分布测试的方法是准光学腔测试法<sup>[1]</sup>,该方法将高斯光斑打在超导薄膜样品表面上,通过测试探头的无载品质因数,得到HTS

薄膜的微波表面电阻;利用移动装置微调移动支架,使高斯光斑能够打在超导薄膜样品表面上不同区域,实现HTS微波表面电阻分布的测试。然而该方法只具有中等的灵敏度与精度<sup>[4]</sup>,并且工作频率需达到100 GHz左右,这样高的工作频率严重阻碍和限定了该方法在国内的推广及应用。考虑到以上两种测试方法各自的局限性,即高温超导薄膜微波表面电阻分布测试装置高分辨率与通用性不兼容问题,本文利用镜像谐振器测试法相关原理,通过引入金属环,研究了一种新的HTS薄膜微波表面电阻分布的测试方法。其工作频率在32 GHz左右,较文献[3]使用的准光腔测试法(工作频率为145 GHz)测试频率降低了近5倍,工作频率得到了大大的降低,工作条件易于实现;其分辨率为直径5 mm,面积 $19.6 \text{ mm}^2$ 的圆面,较文献[1]使用的双端短路单介质谐振

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2016-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61301055)

作者简介: 陈柳(1985-),男,博士生,主要从事高温超导薄膜微波非线性方面的研究。

器法(分辨率为直径16 mm, 面积201.1 mm<sup>2</sup>的圆面)提高了10倍以上。

## 1 分布测试方法的理论

为了提高HTS薄膜微波表面电阻分布测试的分辨率, 常用思路是使参与谐振器谐振的HTS薄膜面积减小, 目前通用的可行手段是将介质谐振器和腔体内的能量高度汇聚。双介质谐振器法测微波表面电阻分布通过缩小谐振器径向直径来实现能量汇聚, 减小参与谐振器谐振的HTS薄膜面积, 以此达到较高的分辨率; 准光学腔测试法与光学聚焦的方法类似, 将电磁能量高度汇聚, 集中作用于超导薄膜的小片区域中, 使该小片区域参与谐振器的谐振, 实现较高的分辨率。

对于目前的镜像介质谐振器<sup>[5-6]</sup>理论模型来说, 使介质谐振器能量汇聚, 提高分辨率需要缩小谐振器腔体的径向直径。然而由于腔体直径变小, 腔体壁损耗增加, 谐振器的无载品质因数 $Q$ 值下降, 测试灵敏度与精度都将降低。为了解决这个矛盾, 在腔体里引入了低损耗的环状结构, 使腔体内的能量达到一定程度的汇聚, 并使参与谐振腔谐振的HTS薄膜的面积降低, 以此来提高测试腔的分辨率。该方法不需要改变腔壁径向直径, 谐振器能够保持较高的无载品质因数 $Q$ 值, 测试装置的不确定度将降低, 其测试腔结构示意图如图1所示。

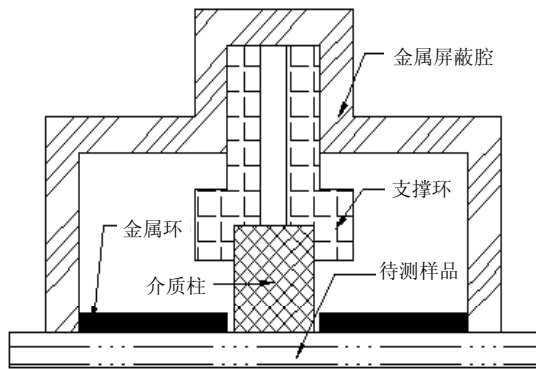


图1 新的HTS薄膜微波表面电阻分布测试装置

测试装置由测试头和待测样品组成。测试头由蓝宝石介质柱、聚四氟乙烯支撑环、金属环、屏蔽腔构成, 且要求它们同轴。整个装置的能量主要集中在蓝宝石附近, 支撑环主要用来固定蓝宝石, 保持蓝宝石位置稳定且始终与金属屏蔽腔同轴。金属环将介质柱和腔体内的能量汇聚, 提高测试装置的分辨率。待测样品分别是与测试头完全一致的校准探头、已知阻值的镀金铜板、高温超导薄膜。

新的分布测试方法在以往的镜像介质谐振器法的结构基础上, 通过引入低损耗的金属环, 将腔体内径向电磁能量用金属环来束缚, 使得作用在超导薄膜表面上的电磁波能量产生一定程度的汇聚, 达到提高测试分辨率的目的; 同时由于金属环的引入, 谐振腔壁的直径不再受限于样品被测区域的尺寸, 腔体直径的选择拥有更大的空间, 可大大降低腔壁损耗导致的不利影响。由于新引入的金属环很薄, 且金属环圆对称的边界条件仅会对局部电磁场形成束缚作用, 并未切断TE<sub>012+δ</sub>模式圆周方向的电流, 因此镜像介质谐振器测试理论<sup>[7-8]</sup>仍然适用。

新的HTS薄膜微波表面电阻分布测试装置可以通过测量谐振腔的 $Q$ 值来实现测量HTS薄膜 $R_s$ , 进而实现对HTS薄膜微波表面电阻分布的测试。谐振腔的无载品质因数为<sup>[8]</sup>:

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

式中,  $A$ 、 $B$ 是电磁场积分的比值, 它仅与电磁场的分布情况有关。确定 $A$ 、 $B$ 的值的过程称为“校准”, 其校准步骤分别是加载与测试探头完全一致的校准探头和加载金板的测试<sup>[8]</sup>, 校准过程不影响测试腔内的电磁场分布。最后将高温超导薄膜作为测试探头的短路面, 即待测样品为超导薄膜时, 测得此时测试探头在谐振频率时的无载品质因数 $Q_{0\text{HTS}}$ , 就得到HTS薄膜工作在谐振频率下的微波表面电阻值为:

$$R_{\text{sHTS}} = (1/Q_{0\text{HTS}} - A)/B \quad (2)$$

此时测得的就是与金属环内径圆面所接触到那部分HTS薄膜的阻值, 然后通过移动HTS薄膜或测试探头, 实现HTS薄膜微波表面电阻分布的测试。

## 2 分布测试方法的仿真和分析

测试装置谐振腔体的工作模式利用最常见的TE<sub>011+δ</sub>模作为其工作主模, 通过运用电磁仿真软件对腔体进行头对头仿真, 发现谐振频率下腔体的无载品质因数 $Q_{0\text{H}}$ 和腔体的灵敏度都较低, 不利于测试装置进行相关的测试。本文改用TE<sub>012+δ</sub>模作为其工作主模, 头对头仿真测试时, 腔体在谐振频率下的无载品质因数 $Q_{0\text{H}}$ 得到了提高, 保证了测试装置的灵敏度。

对于测试装置参数的确定, 首先考虑到测试谐振腔的能量主要集中在介质柱蓝宝石附近, 故在仿真过程中, 优先确定蓝宝石的尺寸, 最终确定了蓝宝石的直径为3.8 mm, 高度为3.8 mm。其次是确定金属环的厚度, 金属环厚度越薄对测试腔体不利影

响越小, 并越有利于腔体内能量汇聚。当金属环厚度为0.1 mm, 头对头仿真时, 无载品质因数高达200 000, 考虑到实际的加工制作, 根据实际加工水平, 将环状结构厚度定为0.2 mm, 此时头对头仿真的无载品质因数为160 000左右。通过腔体的仿真计算, 最终确定的腔体主要结构尺寸如下: 金属环内径5 mm, 厚度0.2 mm; 下空气腔的直径10 mm, 高度8 mm; 上空气柱直径1 mm, 高度3 mm。

通过电磁仿真软件模拟加载HTS薄膜时, 其谐振频率下的电磁场分布如图2所示, 图2a为加载超导薄膜时的电场分布图, 图2b为加载超导薄膜时的磁场分布图。由该图可知能量主要集中在兰宝石附近, 且其工作模式为 $TE_{012+\delta}$ 模。

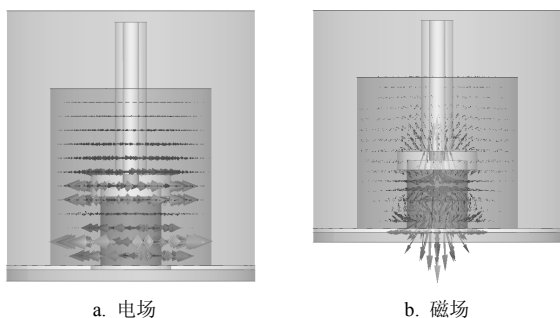


图2 测试谐振腔加载超导薄膜时的电磁场分布

确定腔体尺寸后, 在该尺寸下对HTS薄膜微波表面电阻分布测试装置进行了头对头模拟仿真, 其电磁场分布如图3所示。由图可知, 测试探头和校准探头的电磁场分布完全对称, 均是 $TE_{012+\delta}$ 模。因加载校准探头进行校准时, 并不会改变测试腔内的电磁场分布, 所以以往的镜像法校准步骤依然适用于新的分布测试方法。

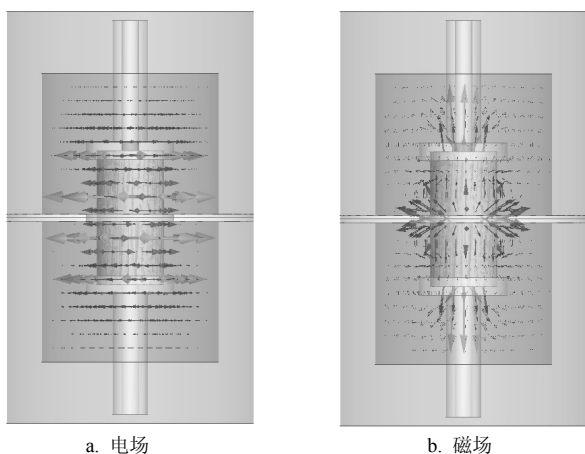


图3 测试谐振腔加载校准探头时的电磁场分布

用电磁仿真软件进行头对头模拟仿真时本征模式的仿真结果如下: 谐振频率32.05 GHz, 无载品质因数 $Q_{0H}$ 为166 804, 临近模式的谐振频率与谐振中心

频率相距0.3 GHz, 很好地抑制了杂模干扰。由此时无载品质因数, 结合式(1)可以算出 $A$ 的值为 $6.00 \times 10^{-6}$ 。用电磁仿真软件进行了 $S_{21}$ 频率扫描, 其结果如图4所示。图4中, 谐振中心的工作频率为31.92 GHz, 此时 $S_{21}$ 为-36 dB, 谐振中心的工作频率前后0.5 GHz范围内无其他杂模谐振, 较好地抑制了其他杂模干扰。同时由于耦合装置的引入, 谐振中心的工作频率相比本征模式的工作频率有所偏移。

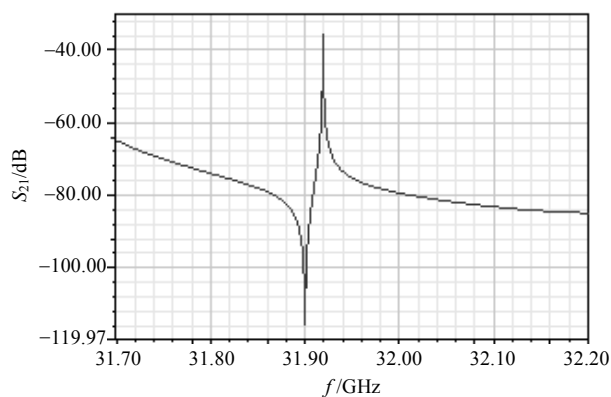


图4 加载校准探头时的 $S_{21}$ 频率扫描结果

在金板模拟仿真中, 所加载的金属是已知工作在12 GHz时阻值为16.67 m $\Omega$ 的镀金铜板。用电磁仿真软件仿真后, 其测试腔工作模式是 $TE_{012+\delta}$ 模, 工作频率为32.05 GHz, 无载品质因数 $Q_{0N}$ 为3 3242, 结合之前算出的 $A$ 值, 可算出 $B$ 值为 $8.84 \times 10^{-4}$ 。由此完成了腔体的校准仿真。

加载金属的 $S_{21}$ 频率扫描结果和加载超导的 $S_{21}$ 频率扫描结果图形大致相同, 因此本文只给出了加载超导时的 $S_{21}$ 频率扫描结果, 如图5所示。谐振中心的频率为31.97 GHz, 耦合还是中等耦合,  $S_{21}$ 为-33 dB。在谐振中心工作频率前后1 GHz范围内, 无其他杂模谐振, 较好地抑制了临近杂模干扰, 降低了测试的不确定度。

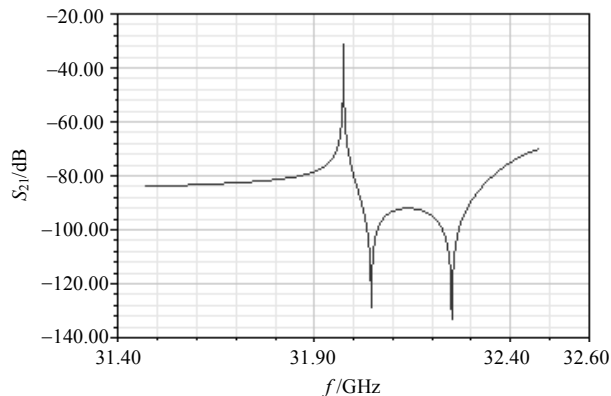


图5 加载超导时的 $S_{21}$ 频率扫描结果  
为验证新的HTS薄膜微波表面电阻分布测试方

法的不确定度, 本文又模拟仿真了加载超导薄膜的情况。由于超导阻值与其工作频率的平方成正比, 因此将HTS薄膜微波表面电阻都归一化到温度77 K、频率在10 GHz时的 $R_s$ , 以此为参考来对比仿真模拟算出的阻值和实际阻值的差距。加载超导薄膜时, 测试探头的无载品质因数为 $Q_{0HTS}$ , 其最终结果如表1所示, 表中,  $A=6.00 \times 10^{-6}$ ,  $B=8.84 \times 10^{-4}$ 。

表1 模拟对比加载不同超导薄膜仿真实验

$R_s/m\Omega$	$Q_{0HTS}$	标准偏差	相对标准偏差/%
0.30	115 331	0.005 4	1.80
0.35	109 402	0.003 6	1.03
0.40	104 340	0.004 8	1.20
0.45	99 650	0.005 1	1.13
0.55	91 393	0.005 3	0.96

由上面的模拟仿真结果可知, 新的测试模拟装置具有较高的精度与准确度, 标准误差均优于0.005 4 mΩ, 相对标准误差均优于1.8%。且超导薄膜阻值每变化0.05 mΩ, 测试探头的无载品质因数将相应的变化5 000左右, 测试装置的灵敏度也较高, 能较好地满足超导薄膜的测量, 验证了新测试方法的可行性。

### 3 实验结果

基于前面的仿真, 搭建了分布测试装置, 其测试结构如图6所示。

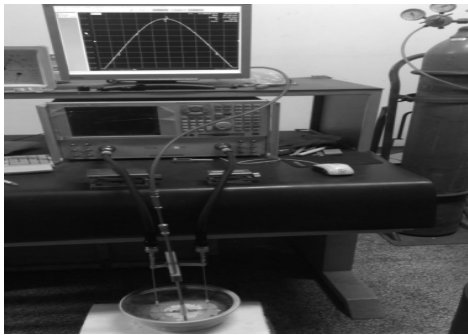


图6 分布测试装置

分布测试装置在进行分布测试前, 先进行校准, 即分别加载校准腔和已知阻值的金板。其 $S_{21}$ 频率扫描结果分别如图7和图8所示。从图7可知, 加载校准腔时, 其工作在31.98 GHz, 有载品质因数为123 402。从图8可知, 加载金板时, 工作频率是31.96 GHz, 有载品质因数是26 103。再进行其对应的 $S_{11}$ 和 $S_{22}$ 扫描, 就可求出加载校准腔和金板时的无载品质因数。由此完成测试的校准实验。

基于本文的仿真结果和实验结果, 可以看出,

实际制作的测试装置相对理想仿真, 无载品质因数都有所下降。这主要是由于实际使用的兰宝石和屏蔽腔内壁表面粗糙度造成。然而, 由于测试腔和校准腔对称, 通过校准实验后进行分布测试的实验结果是准确的。

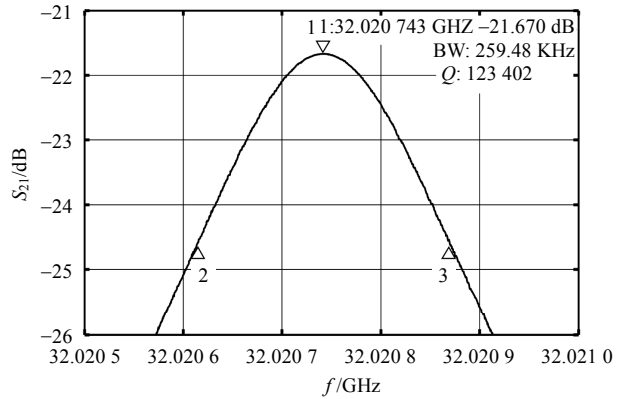


图7 加载校准腔 $S_{21}$ 频率扫描结果

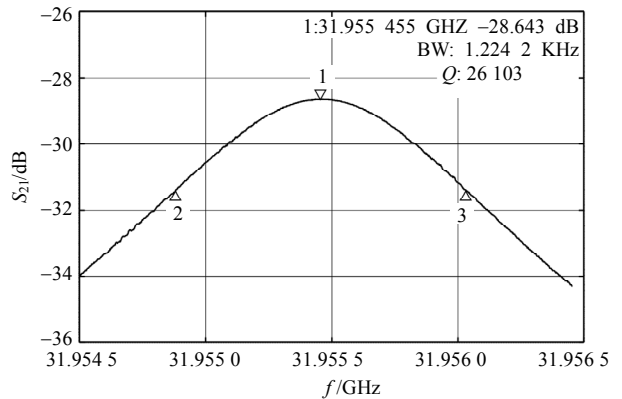


图8 加载校准金板 $S_{21}$ 频率扫描结果

为了解临近模式对其工作谐振模式的干扰情况, 对加载超导薄膜时 $S_{21}$ 频率曲线进行了宽带扫描, 其结果如图9所示。从图中可以看出, 在其谐振频率周围1.4 GHz的范围内无其他杂模干扰, 很好地抑制了临近模式的干扰。

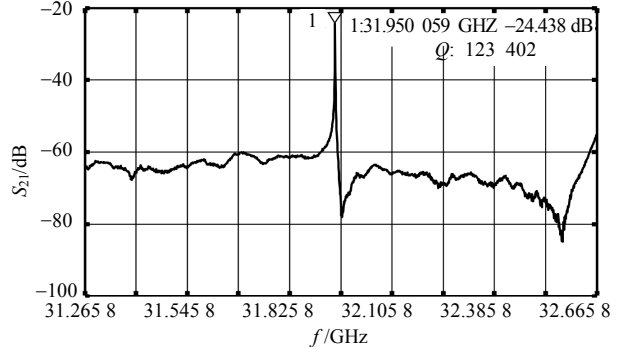


图9 加载超导时的宽带 $S_{21}$ 扫描结果

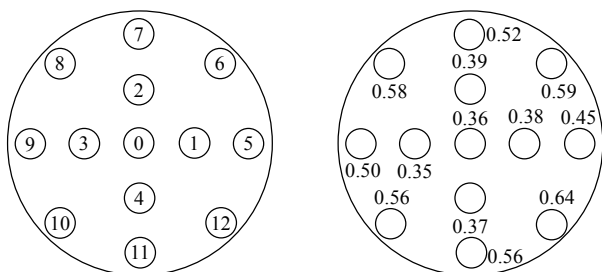
本文利用前面搭建的分布测试装置以及校准实验结果进行了分布测试实验, 对一片在LAO衬底上

制作两英寸的双面超导薄膜取了多点进行测试。通过移动超导薄膜，测试超导薄膜不同区域的阻值的大小实现分布测试，其测试结果如表2所示。表中的超导阻值都是基于超导阻值与频率的关系都归一到77 k、10 GHz的大小， $A=6.98 \times 10^{-6}$ ， $B=1.014 \times 10^{-3}$ 。

为了更形象地说明超导薄膜的分布测试结果，根据表2的测试结果，给出了这片超导薄膜的电阻分布示意图如图10所示。图10a为表2中的数据在这片超导薄膜中对应的区域，图10b为对应区域处的阻值大小。

表2 超导薄膜微波表面电阻的分布测试结果

区域	$f/\text{GHz}$	$Q_L$	$Q_0$	$R_s/m\Omega$
0	31.98	74 748	93 375	0.36
1	31.94	73 665	91 336	0.38
2	31.92	76 232	90 548	0.39
3	31.95	74 781	94 423	0.35
4	31.96	76 487	92 365	0.37
5	31.93	69 630	85 858	0.45
6	31.92	65 932	76 106	0.59
7	31.90	68 974	80 796	0.52
8	31.94	68 197	76 731	0.58
9	31.93	71 567	81 906	0.50
10	31.91	67 091	78 122	0.56
11	31.91	67 186	78 104	0.56
12	31.94	62 382	73 656	0.64



a. 测试点位置示意图

b. 各测试点微波表面电阻值

图10 超导薄膜的电阻分布示意图

## 4 结束语

新的HTS薄膜微波表面电阻分布测试方法能够进行单片高温超导薄膜 $R_s$ 分布的测量，其工作在32 GHz左右，能够实现分辨率为直径5 mm的圆面，很好地解决了高温超导薄膜测试装置通用性和分辨率

不兼容的问题。另外，新的分布测试方法较好地抑制了临近模式的杂模干扰，其谐振频率1.4 GHz范围无杂模干扰，测试灵敏度较高，降低了测试的不确定度。新的分布测试方法简单方便，易于实现，只需进行简单的校准，就可以进行分布测试，有力支持了超导行业的发展。

## 参 考 文 献

- [1] KUSUNOKI M, TAKANO Y, NAKAMURA K, et al. Demonstration of surface resistance mapping of large-area HTS films using the dielectric resonator method[J]. Physica C Superconductivity, 2003, 383(4): 374-378.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22586-2008. 高温超导薄膜微波表面电阻测试[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008-12-15.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 22586-2008. Measurements of surface resistance of high temperature superconductor thin films at microwave frequencies[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008-12-15.
- [3] TAO B W, LI Y R, LIU X Z, et al. A Biaxial rotation for depositing homogeneous large-area double-sided  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  thin films[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2002, 20(6): 1898-1902.
- [4] 沈致远. 高温超导微波电路[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
SHEN Zhi-yuan. High-temperature superconducting microwave circuits[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [5] LUO Z X, YANG K, LU J, et al. Sapphire resonator probe for accurate characterization of microwave surface resistance of high  $T_c$  superconductive thin films[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 1998, 20: 311-315.
- [6] ZHANG Y, LUO Z, YANG K, et al. Measurement method of microwave surface resistance of high  $T_c$  superconductive thin films[J]. Physica C: Superconductivity, 2003, 385(4): 473-476.
- [7] LU J, REN X, ZHANG Q. A  $\text{TE}_{011+\delta}$  mode sapphire resonator probe for accurate characterization of microwave surface resistance of HTS thin films[C]//Singapore ICCS'94, Conference Proceedings. [S.l.]: IEEE, 1994, 3: 959-963.
- [8] ZENG C, LUO Z X, BU S R, et al. A novel method for the measurement of frequency-character of surface resistance of HTS thin film[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(11): 1088-1091.

编辑 漆蓉