



高温超导薄膜表面电阻频率特性测试新方法

曾成^{①②}, 罗正祥^{①②}, 补世荣^{①②}, 羊恺^①, 张其劭^①

① 电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054;

② 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054

E-mail: zenghijk@uestc.edu.cn

2009-03-22 收稿, 2009-09-01 接受

摘要 提出了一种利用兰宝石的多个谐振模式对高温超导薄膜在多个频率点下的微波表面电阻进行测试的新方法. 该方法测试灵敏度高, 动态范围大并能在同一个温度循环内对单片高温超导薄膜微波表面电阻的频率特性进行表征, 极大地减少了测试工作量, 为高温超导薄膜的研究及工业化生产提供了有力保障.

关键词

高温超导薄膜
微波表面电阻
多模测试
频率特性

利用高温超导薄膜制作的微波无源器件已经越来越广泛地应用于民用通信设备和雷达侦查设备前端. 这类器件主要包括滤波器、延迟线和天线, 与常规微波无源器件相比, 它们带内插损更低, 具有更好的矩形系数; 体积更小, 损耗更低; 接收灵敏度更高. 因此在提高通话质量, 增加侦察距离和抑制干扰信号方面, 高温超导器件有着显著的优势.

随着高温超导产业化进程的深入, 优质超导薄膜的需求量越来越大. 在薄膜的制作过程中, 薄膜的微波表面电阻(R_s)的大小是衡量薄膜质量的指标之一. 对超导薄膜的微波表面电阻进行测试, 可对薄膜好坏进行检测, 有利于制作工艺的调整; 从器件设计的角度来看, 使用材料的电阻值, 是仿真设计微波无源器件不可或缺的基本参数, 而准确的电阻值往往是制作高性能器件的先决条件, 准确提取薄膜的微波电阻值, 可保证高性能超导微波器件的设计效率. 因此, 超导薄膜 R_s 的测试在超导产业化过程中是不可缺少的一个重要环节. 在超导机理的理论研究过程中, 超导材料微波电阻 R_s 随频率、温

度等物理量的变化关系一直是研究者关心的内容, 而理论研究的正确与否通常要靠实验方法验证, 因此在理论研究过程中超导薄膜 R_s 的测试同样不可或缺.

到目前为止, 高温超导薄膜 R_s 的测试方法都是基于建立 R_s 与微波谐振结构无载品质因数 Q_0 的关系式, 通过测得 Q_0 , 以获取高温超导薄膜的微波表面电阻值^[1~3]. 主流高温超导薄膜 R_s 测试方法的研究, 都是围绕利用低损耗, 高介电常数的介质柱作为谐振结构储能主体这一主题展开. 不同的是谐振结构由单端短路^[4]还是双端短路^[5]构成, 或是利用单模^[6]还是双模进行测试^[7]. 然而这些方法所得到的只是高温超导薄膜在单一频点下的 R_s , 在测试高温超导薄膜微波表面电阻的频率特性时, 需要更换不同尺寸的介质柱, 增大了测试的复杂程度, 给实际的测试工作带来困难.

本文提出了一种利用单个谐振腔的多个谐振模式, 对高温超导薄膜微波表面电阻频率特性进行测试的方法. 该方法无需对超导薄膜进行预处理并能

引用格式: 曾成, 罗正祥, 补世荣, 等. 高温超导薄膜表面电阻频率特性测试新方法. 科学通报, 2009, 54: 3677~3681

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. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0639-8

直接测试单片超导薄膜的 R_S , 且其测试过程简易, 计算公式简单, 并可推广到包括低温超导在内的其他导体微波表面电阻的频率特性测试.

1 多模测试方法

在众多 R_S 测试方法中, 只有少数方法能直接对 R_S 的频率特性进行测试, 其中文献[8, 9]分别代表了两种不同类型的测试方法. 文献[8]中使用平面结构的谐振器, 在一片两英寸双面 YBCO 超导薄膜上刻蚀出一段共面波导传输线, 并将其作为谐振器, 工作模式为 TEM 模. 通过对其各次谐波的谐振峰无载品质因数的测试, 得到该测试样品 R_S 的频率特性. 该测试方法可对单片薄膜 R_S 进行直接测试, 不过在对被测样品进行电路刻蚀的过程中将不可避免的引入误差, 同时, 由于该方法使用谐振器的无载品质因数较低, 测试灵敏度受到一定限制. 文献[9]采用双端由 HTS 薄膜短路的兰宝石介质腔体谐振结构, 首先测试两个相邻 TE 模式谐振峰的无载品质因数得到 HTS 薄膜在一个频点处的 R_S 和兰宝石的损耗角正切 $\tan\delta$, 并利用兰宝石 $\tan\delta$ 值与频率成正比这一关系, 通过测试该谐振器中其他两个 TE 模式的无载品质因数, 得到相应频率下的 R_S 值, 并拟合出频率特性. 该方法的优点在于不需要对测试样品进行预处理, 无需更换兰宝石. 但它不能直接得到单片薄膜 R_S 的频率特性, 同时, 该方法中相邻谐振峰频率的间隔需要仔细设计, 间隔太大则不满足理论模型, 间隔太小则在两个谐振模式之间产生的直接耦合, 将影响测试的不确定度.

因此, 本文在兰宝石镜像法^[10]测试原理的基础上, 提出了采用测试腔中的多个 TE 谐振模式, 对单片高温超导薄膜不同频点下的 R_S 进行测试, 从而得到其频率特性.

根据文献[10]中所述方法, 测试腔中工作模式的无载品质因数 Q_0 可由下式表示: $Q_0^{-1} = A + B \times R_S$, 其中 A, B 是与被测样品微波表面电阻无关的未知常数, R_S 为被测样品的微波表面电阻值, 通过“校准”^[10]可以得到 A, B 的值. 在校准过程中分别测得测试腔加载校准腔和镀银铜板时的无载品质因数 Q_{0H} 和 Q_{0N} , 其中校准腔的结构与测试腔相同, 镀银铜板(简称银板)的微波表面电阻值 R_{SN} 已知. 当加载校准腔时, 由于测试腔和校准腔内工作模式电磁场分布一致, 其接触面为对称面, 其上只有径向磁场, 且无实际的导体,

因此等效于测试腔加载理想导体, 此时 $R_S=0$, 则 $A=Q_{0H}^{-1}$; 加载银板时, $Q_{0N}^{-1}=A+B \times R_{SN}$, 则 $B=(Q_{0N}^{-1}-Q_{0H}^{-1})/R_{SN}$. 计算出 A, B 的值后, 通过测得测试腔加载高温超导薄膜的无载品质因数 Q_{0HTS} , 便可得到超导薄膜的微波表面电阻值 $R_{SHTS}=(Q_{0HTS}^{-1}-A)/B$.

分析可知, 镜像法的“校准”是整个方法的关键点, 其中包括零电阻面的获得和银板准确的微波表面电阻值 R_{SN} . 只要保证了校准腔和测试腔的接触面仅存在径向磁场, 就可获得零电阻面. 加载校准腔后, 测试腔和校准腔组成了一个直径不变、纵向长度为测试腔 2 倍的谐振结构. 根据电磁场原理可知, 所有的 TE 模式均不存在纵向电场分量, 测试腔和校准腔接触面的两边分布着相同的没有纵向电场分量的各次 TE 模电磁场. 对于这些 TE 模而言, 接触面均为对称面, 只有径向磁场, 即测试腔均等效加载零电阻导体. 因此测试腔中所有的 TE 模均可作为工作模式, 对样品的 R_S 进行测试. 因此本文将原有的校准方法和计算公式从单一 TE_{011} 模式^[10,11]推广到多个 TE 模式. 首先加载与测试腔结构一致的校准腔, 测试出测试腔中多个 TE 工作模式的无载品质因数 $Q_{0Hi}(i=1,2,3\dots)$, 下标 i 表示相应的工作模式; 再加载已知微波电阻值 R_{SN} 的金属板, 测得此时测试腔中各模式的无载品质因数 Q_{0Ni} , 即可得到不同工作模式下的 A_i, B_i 值. 然后通过对加载高温超导薄膜谐振腔的多个 TE 模式无载品质因数 Q_{0HTSi} 的测试, 可得到薄膜在多个频点下的微波表面电阻值 R_{SHTSi} .

本文所使用的谐振器为单端短路结构, 图 1 为测试腔结构示意图. 测试腔主要由兰宝石柱、支撑环、截止波导、输入输出接头和屏蔽腔组成. 支撑环由低

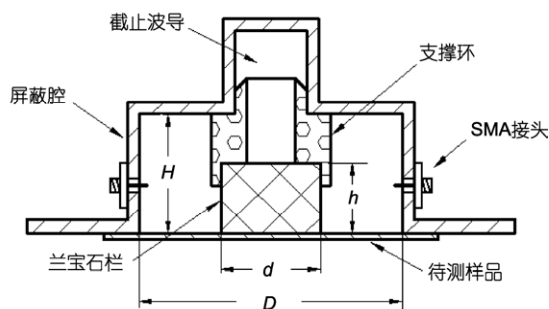


图 1 测试腔结构示意图

损耗、低介电常数的聚四氟乙烯制成,电磁场的激励采用耦合环结构实现.测试腔中各个工作模式的频率分布主要由兰宝石柱尺寸(d, h)和屏蔽腔内径与高(D, H)共同决定,改变截止波导的直径,可以对与工作模式相邻的其他模式的频率进行微调,以减少杂模对工作模式的干扰.通过优化兰宝石柱和屏蔽腔的尺寸,合理选择工作模式的谐振频率对样品的 R_S 进行测试,可准确描述出该样品 R_S 的频率特性.

2 一腔多模测试腔的实现

本文所使用的方法属于谐振器一腔多模的典型应用,在这种情况下,由于谐振模式太多,各相邻频率的模式之间可能存在能量耦合,谐振器的工作模式往往会受其他非工作模式的影响,这对谐振器结构尺寸的设计提出了更高的要求.由于本结构形状不规则,无法利用现有的图表对谐振腔进行设计,本文采用有限元法仿真各个谐振模式的频率,优化屏蔽腔兰宝石柱和屏蔽腔的尺寸,以有效利用谐振腔的各个 TE 模式进行测试.

考虑到 SMA 接头的工作频率上限,谐振腔的最高工作频率应小于 26.5 GHz,通过仿真优化最终确定兰宝石柱的直径为 9.95 mm,高度为 5.24 mm,屏蔽腔内径为 26 mm,高度为 10 mm,截止波导直径为 6 mm.

谐振腔的工作模式为 TE_{011} , TE_{012} , TE_{021} 和 TE_{013} ,各模式相应频率的仿真结果分别为 11 GHz, 17.4 GHz, 19.1 GHz 和 25.3 GHz.

3 测试及分析

图 2 所示为测试腔实物图,在测试过程中,图 2 所示的测试头安装在一个可不断充填保护气体的容器中,并将整个装置浸没在液氮中.本文的测试样品为由溅射法沉积在直径为 50.8 mm,厚度为 0.5 mm MgO 衬底上的 YBCO 薄膜,薄膜厚度大于 500 nm.测试腔在各个工作模式下和各种加载状态下的无载品质因数由 -3 dB 频率点法测得,测试仪器为 Agilent E8363A 矢量网络分析仪.得出所需的常数: $A_1=5.36 \times 10^{-6}$, $B_1=1.62 \times 10^{-6}$; $A_2=9.11 \times 10^{-6}$, $B_2=1.42 \times 10^{-6}$; $A_3=3.51 \times 10^{-6}$, $B_3=7.37 \times 10^{-7}$; $A_4=9.88 \times 10^{-6}$, $B_4=1.03 \times 10^{-6}$; 其中 A, B 的下标分别对应的工作模式为 TE_{011} , TE_{012} , TE_{021} , TE_{013} .由于金比银具有更稳定的物理化学性能,因此本文在校准的第二

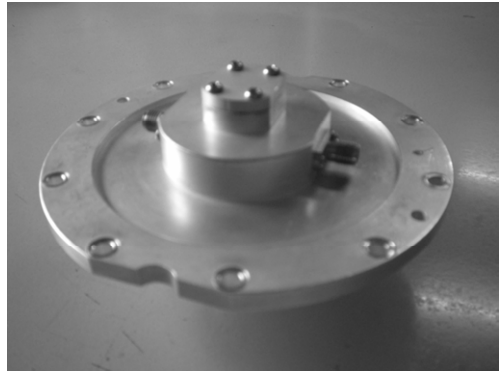


图 2 测试腔实物图

个步骤中采用镀金的铜板作为已知微波表面电阻的待测样品,其在 12 GHz, 77 K 时的微波表面电阻 R_{SN} 为 66.7 mΩ.值得注意的是,由于金属板的微波表面电阻值 R_{SN} 与频率 f 的关系为 $R_{SN} \propto f^{0.5}$,因此在计算 B 时,需将 R_{SN} 换算成各工作频率下的值.

如图 3 所示是测试样品为高温超导薄膜时测试腔中 4 个工作模式的传输系数曲线,各个模式的无载品质因数分别为 164000, 92400, 206700, 81200.从图中可以看到, TE_{011} , TE_{012} 和 TE_{013} 3 个工作模式频率附近均无其他模式干扰;在 TE_{021} 模式频率低端 30 MHz 处有一另外的谐振模式.最后得到该超导薄膜在四个模式谐振频率下的微波表面电阻值 R_S 分别为 0.45, 1.21, 1.81, 2.36 mΩ.图 4 示出了 R_S 测试结果和按照该结果拟合的平方律曲线.

一般来说,介质谐振腔的品质因数主要受介质损耗、屏蔽腔损耗和样品损耗影响.随着频率的升高,高温超导薄膜样品的微波表面电阻值 R_S 将迅速变大,对品质因数 Q_0 影响的权重增加.谐振腔品质因数的高低更能有效地反映超导薄膜 R_S 的好坏.在单一频点测试时,若使用测试头中具有更高无载品质因数的高次 TE 模式作为工作模式,则有利于提高测试灵敏度,减小测试不确定度.然而,由于 TE_{021} 模式频率下方 30 MHz 处有一谐振模式(如图 3(c)所示),因此由杂模引起的 R_S 测试误差,在该模式中比其他工作模式中大,因此由该模式测得的结果,偏离了由其他 3 个模式测试结果拟合出的平方律曲线.尽管如此,从其他 3 个工作模式传输系数的测试曲线和测试结果来看,本文所述的多模测试方法是可行的.

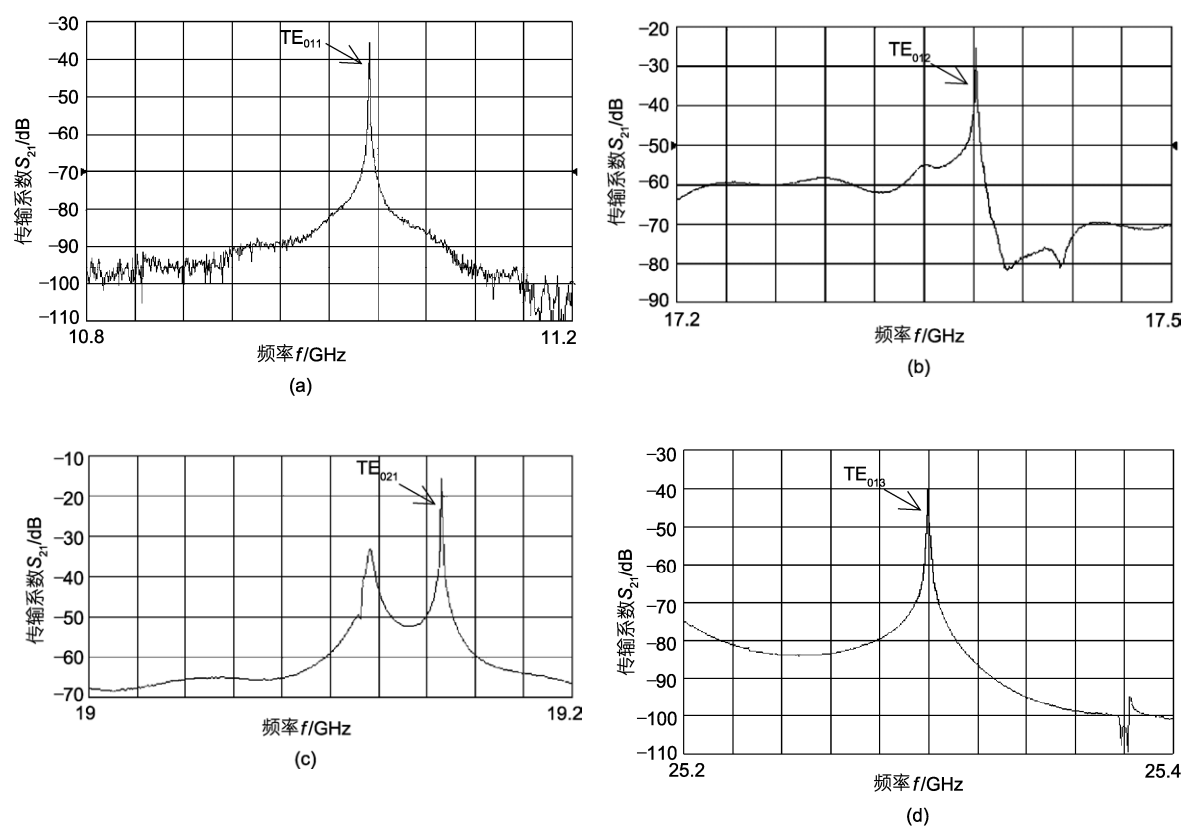


图 3 测试头中各工作模式频率响应曲线
(a) TE₀₁₁; (b) TE₀₁₂; (c) TE₀₂₁; (d) TE₀₁₃

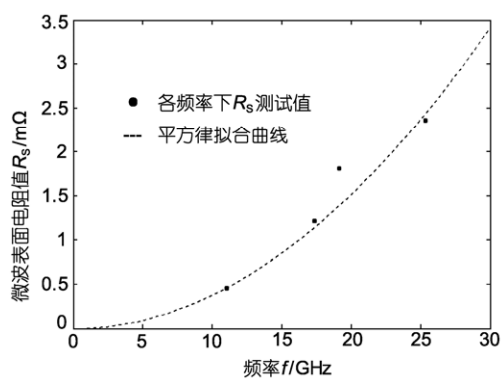


图 4 单片高温超导薄膜 R_s 各频率测试结果及拟合曲线

4 结论

本文提出了一种基于低损耗介质柱谐振器的一腔多模 R_s 测试方法，制作了一个工作在 TE₀₁₁, TE₀₁₂

TE₀₂₁ 和 TE₀₁₃ 模式下的测试腔，并对一 YBCO 薄膜样品 R_s 的频率特性进行了测试，对该方法进行了验证。该方法同时将谐振腔中的多个 TE 模式作为工作模式，对单片高温超导薄膜的微波表面电阻的频率特性进行无损测试，克服了传统 R_s 频率特性测试中需要对测试样品预处理或只能测试两片平均值的缺点。在校准步骤完成后，对样品的测试可在一个温度循环内完成，大大提高了工作效率，并避免了在重复安装测试系统时可能带来损伤测试样品的风险。

根据本文所述的测试方法，若改变输入输出耦合方式，使用上限频率更高的微波接头，并重新对兰宝石介质和屏蔽腔进行设计，可将样品微波表面电阻 R_s 的频率特性测试范围延伸至毫米波频段；同时若改变测试的温度条件和环境可将本测试方法推广到低温超导以及其他微波表面电阻测试领域。

参考文献

- 1 Charles W, Shen Z Y, Pang P, et al. 5 GHz high temperature superconductor resonators with high Q and low power dependence up to 90K. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1991, 39: 1462—1467
- 2 Hashimoto T, Kobayashi Y. Two-sapphire-rod-resonator method to measure the surface resistance of high- T_c superconductor films. *IEICE Trans Electron*, 2004, 87: 681—687
- 3 Saito A, Shirakawa M, Kitamura K, et al. Dependence of surface resistance in HTS thin films on a DC magnetic field. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 3692—3695
- 4 Hashimoto T, Kabayashi Y. An image type dielectric resonator method to measure surface resistance of a high T_c superconductor film. *IEICE Trans Electron*, 2003, 87: 30—36
- 5 Nickolay C, Alexander B, Sergey B, et al. Measurements of millimeter-wave surface resistance and temperature dependence of reactance of thin HTS films using quasi-optical dielectric resonator. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 2919—2922
- 6 Jacob M, Mazierska J, Leong K, et al. Surface resistance measurements of HTS thin films using SLAO dielectric resonator. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2003, 13: 2909—2912
- 7 International Standard IEC 61788-7, Part 7: Electronic characteristic measurements surface resistance of superconductors at microwave frequencies, 2006: 17
- 8 Wang Y, Su H T, Huang F, et al. Measurement of YBCO thin film surface resistance using coplanar line resonator techniques from 20 MHz to 20 GHz. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2007, 17: 3632—3639
- 9 Hashimoto T, Kabayashi Y. Frequency dependence measurements of surface resistance of superconductors using four modes in a sapphire rod resonator. *IEICE Trans Electron*, 2003, 86: 1721—1728
- 10 Zhang Y M, Luo Z X, Yang K, et al. Measurement method of microwave surface resistance of high T_c superconductive thin films. *Physical C*, 2003, 385: 473—476