

文章编号: 2095-4980(2017)01-0081-03

平行板法测量高温超导材料表面特性

张 海¹, 王传福¹, 王伟鹏², 樊飞燕¹

(1.南昌工程学院 信息工程学院, 江西 南昌 330099; 2.西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘 要: 设计分析了一种工作在 3~6 GHz 内嵌平行板谐振器(PPR)的矩形腔测量系统, 给出其几何结构设计方案, 在预设观察模式和频点下确定腔体尺寸; 采用电磁模拟分析方法, 在腔体谐振背景下识别平行板谐振器模式。在此基础上通过品质因数求解获得表面电阻 R_s , 从而获取高温超导材料的表面电磁特性。将高温超导材料应用于射频乃至更高频段的微波器件中。

关键词: 高温超导薄膜; 表面电阻; 平行板谐振器

中图分类号: TN751.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0081

A Parallel Plate Resonator technique for microwave loss measurements on high- T_c superconductive film

ZHANG Hai¹, WANG Chuanfu¹, WANG Weipeng², FAN Feiyan¹

(1.School of Information Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang Jiangxi 330099, China;

2.School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: A test system of a rectangular cavity with a Parallel Plate Resonator(PPR) inside, working between 3 GHz and 6 GHz, is designed and analyzed. Its geometric structure is discussed in detail and its sizes can be determined by three sets of modes and frequencies. In the context of the resonance of the cavity, the mode of the PPR can be identified, the values of Q are obtained as well, and therefore, the microwave surface resistance(R_s) can be determined. The electromagnetic characteristics of high- T_c superconductive film can be obtained by analyzing the simulation results. The high- T_c superconductive material can be applied to microwave devices in RF and some higher bands.

Keywords: high- T_c superconductive film; surface resistance(R_s); Parallel Plate Resonator

高温超导材料以其独特的零电阻性、完全抗磁性、极低的高频损失, 广泛用于高性能微波电子器件中。由于具备很低的微波表面电阻(R_s)和较高的临界电流密度(J_c), 用高温超导薄膜制成的无源微波器件具有高 Q 值、低插损、尖锐的滤波截止特性; 在有源微波器件的应用上也表现出极低的噪声(直至量子极限)和很低的功率损耗(纳瓦级)^[1]。

高温超导薄膜制备技术的提高, 薄膜应用更加广泛, 因而迫切需要对超导薄膜主要特性参数——表面电阻(R_s)进行精确的测试, 其大小将直接影响到材料的导电和导磁性能。传统微波表面电阻测量法包括圆柱腔谐振器法、平行板谐振器法、微带谐振器法、介质谐振器法。本文采用矩形腔内嵌平行板谐振器(PPR)的方法对其进行测量。相比传统方法, 它兼具测量精确性高、重复性好和对高温超导薄膜无损性等优点, 但技术相对复杂。

电磁波通过耦合天线馈入矩形腔, 并产生振荡, 由于矩形腔和平行板谐振器之间耦合, 会激发平行板的振荡模式。在腔体谐振背景下识别平行板谐振器振荡模式, 通过品质因数, 得出 R_s 。将平行板谐振器置于矩形谐振腔中, 在腔体振荡电磁环境下, 平行板谐振器在其频点发生较弱强度的谐振。因此要求腔体的谐振频率和平行板谐振频率有一定的间隔, 避免二者之间发生过强耦合。如果腔体的振荡强度太弱, 那么整个系统都难以起振, 将难以出现振荡峰; 如果太强的话, 由于平行板谐振器在整个系统所占较小的比例份值, 腔体的过强振荡会将平行板的振荡完全覆盖。平行板谐振器振荡模式的识别是整个测量的关键^[2]。

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2015-12-18

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究资助项目(GJJ151115); 南昌工程学院 2015 年大学生科研训练计划资助项目(2015041); 2012 年度南昌工程学院青年基金资助项目(2012KJ015); 2013 全国(省)大学生创新创业训练计划资助项目(201311319008)

1 谐振腔设计

针对 3~6 GHz 频段内高温微波超导材料特性, 预设 3 个振荡频率, 分别为 3.3 GHz, 4.8 GHz 和 5.8 GHz, 与之对应的模式是 110,011 和 102, 求解场方程可获得腔体几何尺寸(80 mm × 40 mm × 50 mm)。在场结构中耦合天线的影响非常重要, 在满足谐振的前提下, 不破坏原有的本征模式。通过调节天线结构和腔体尺寸, 以获得合适的腔体谐振曲线和场分布。耦合天线结构调节主要在于同轴线内导体半径, 及插入的深度。图 1 为未设置馈入天线本征模式计算所获得腔体模式分布的剖面图, 图 2 为设置馈入天线后的场分布。可以看出, 耦合天线对场分布的影响是有限的。

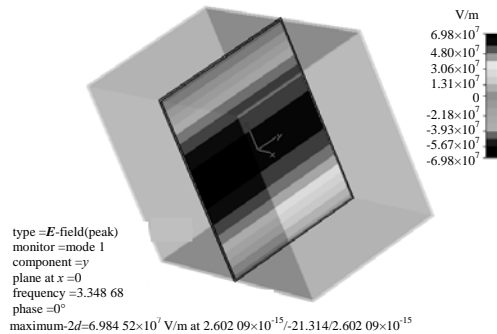


Fig.1 Field distribution(without coupling)
图 1 场分布(无耦合天线)

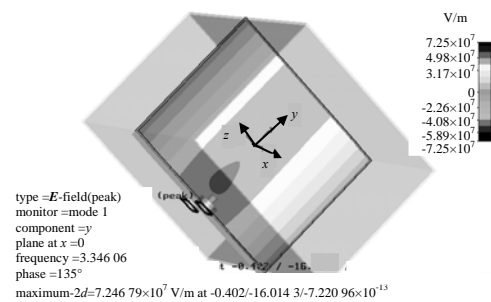


Fig.2 Field distribution(with coupling)
图 2 场分布(含耦合天线)

2 平行板谐振器

平行板谐振器由上下 2 片间距约为 0.01~0.1 mm, 长宽 10 mm × 10 mm 超导薄膜和内部方形介质构成, 其构成与机理和平行板波导有相似之处, 在模拟计算中用良导体替代。平行板谐振器属于非齐次边界问题, 严格场分析比较困难。当介质的介电率较高时, 介质与空气的界面近似于开路面, 电磁波在界面的反射系数接近于 1, 应用开路磁壁法对其进行近似分析是十分有益的。其边界可认为由上下 2 个短路电壁, 以及周围 4 个开路磁壁构成。理想状态下谐振频率由振荡模式、腔体尺寸及腔中填充介质决定^[3]。

超导薄膜的有限电导率, 以及近似的开路边界条件, 将引起不同的 E 型和 H 型波型之间的交叉耦合, 单独的某个波型难以满足边界条件, 基本波函数的线性组合才是本问题的解。两超导平行板间激发电磁波形成驻波。由于两平行板间距尺寸很小, 可假设沿着 y 向电磁场在隔片内恒定。表面电流为:

$$J = \hat{y} \times H = J_x \hat{x} + J_z \hat{z} \quad (1)$$

注意到 H 在 y 方向没有分量。平行板谐振器的损耗由 3 部分构成: 介质隔片介质损耗、边缘场辐射损耗和薄膜表面电阻损耗。

$$Q^{-1} = \tan \delta + \alpha s + (\beta R_s / s) \quad (2)$$

式中: s 是薄膜的间距, 即中间介质的厚度; α, β 则决定于谐振器形状和频率。

3 结果分析

图 3、图 4 是腔体加载平行板谐振器后, 整个系统的 S_{21} 计算曲线。在腔体谐振频点依然有很明显的谐振峰出现, 曲线的形态基本一致。这意味着平行板谐振器在整个系统占据较小的比例, 不对整个腔体的振荡产生剧烈的影响, 即可认为腔体和平行板谐振器之间发生的是较弱电磁耦合。

在 4.35 GHz, 5.6 GHz 和 6 GHz 附近出现新的谐振峰, 这些新的峰的出现有多种可能: a) 平行板谐振发生了预想的谐振; b) 由于平行板、介质隔片、介质衬底的引入, 对腔体产生微扰, 产生寄生耦合。因此, 从加载后的谐振曲线中识别出平行板谐振器的谐振峰极为关键。

由于平行板中振荡解是基本波函数的线性组合, 应用单一模式谐振频率计算公式对谐振频点预估, 偏差较大。实验中利用伦敦穿透深度对温度的敏感, 通过温度的变化, 寻找随温度变化的频点, 以此确定平行板谐振峰。其判别成本较高, 过程较复杂。

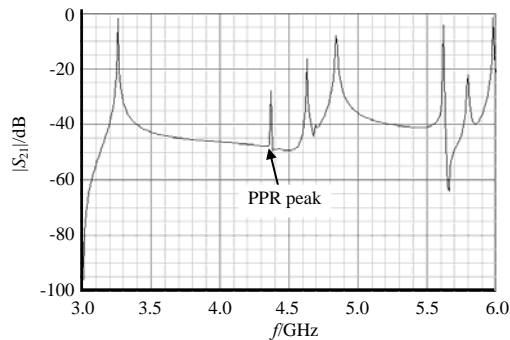
Fig.3 $|S_{21}|(\epsilon_r=24.5)$

图 3 腔体加载 PPR(介质隔片介电常数 24.5)

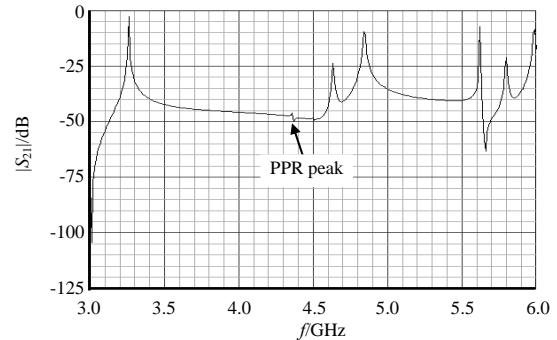
Fig.4 $|S_{21}|(\epsilon_r=1)$

图 4 腔体加载 PPR(介质隔片介电常数 1)

此处采用电磁仿真手段识别 PPR 振荡模式。通过前面的推导可知, 近似将边界面处理为 2 个短路面及 4 个开路面, 将电磁场约束在平行板谐振器内, 减少辐射损耗, 产生振荡。合适的较高介电常数介质的界面与导体壁有类似的特性, 能使电磁波发生近似完全的反射, 构成谐振。当介电常数较高, 且介质损耗较小时, 能更好地禁锢电磁能于谐振腔内。因此当降低 PPR 内部隔片介电常数, 属于平行板的谐振峰将会变得平坦。图 4 是降低介质隔片介电常数后系统谐振曲线, 4.35 GHz 处的谐振峰明显降低, 据此可判定此峰是属于平行板的谐振峰。在此判断的基础上, 通过品质因数的计算求解即可获得薄膜的表面电阻特性。

4 结论

由于非齐次边界条件的存在, 通过研究开路边界条件和平行板内部隔片介电常数对平行板谐振器谐振峰形态的影响, 实现在谐振曲线简单便捷地识别平行板谐振器的谐振峰, 进而可通过谐振 Q 值求出超导薄膜表面电阻。选择合适的介质隔片非常重要, 隔片的介电常数和厚度, 对结果影响非常明显。

参考文献:

- [1] 沈志远. 高温微波超导电路[M]. 王索玉, 盛克敏, 译. 北京: 国防工业出版社, 2000. (SHEN Zhiyuan. High Temperature Microwave Superconducting Circuit[M]. Translated by WANG Suoyu, SHENG Kemin. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.)
- [2] TABER R C. A parallel plate resonator technique for microwave loss measurements on superconductors[J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(8): 2200-2206.
- [3] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. (ZHANG Keqian, LI Dejie. Electromagnetic Theory in Microwaves and Optoelectronics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001.)

作者简介:



张 海(1977-), 男, 南昌市人, 博士, 讲师, 研究方向为电磁场与微波技术. email: worklab_cst@163.com.

王传福(1995-), 男, 山东省陵县人, 学士, 研究方向为信号检测与处理.

王伟鹏(1994-), 男, 安徽省来安县人, 在读硕士研究生, 研究方向为卫星导航及抗干扰技术.

樊飞燕(1977-), 女, 江西省修水县人, 硕士, 研究方向为通信工程.