

文章编号: 1001- 4322(1999)03- 0332- 05

高 T_c 超导谐振器微波特性研究*

杨志涛, 赵 夔, 吴根法, 王莉芳, 张保澄, 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所超导腔组, 北京 100871)

摘 要: 研究了高 T_c 超导谐振器的微波特性特别是表面电阻 R_s 和磁场穿透深度 λ 给出了 R_s 随温度变化的曲线以及穿透深度的测量结果。实验中采用了由 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜和蓝宝石片构成的平行板谐振器。

关键词: 超导加速器; 高 T_c 超导谐振器; 表面电阻; 穿透深度

中图分类号: O 511. 9; TL 503. 2 **文献标识码:** A

随着高温超导体的发现, 其应用也在各个领域蓬勃展开。其中高 T_c 谐振器(腔)尤为引人注目, 由于它的谐振品质因数较高、体积小、其超导转变温度与低温超导谐振器相比又高出许多, 因此有着巨大的应用价值。当前这种应用主要集中在微波电子学领域, 比如使用高 T_c 谐振器来开发制作滤波器、延迟线以及阵列天线等高精度微波器件。

在加速器领域, 可以考虑用高品质的高 T_c 谐振器来实现粒子加速, 与低温超导加速腔(比如工作在液氮温度的纯铌腔或者铜铌溅射腔)相比, 这种考虑不仅是由于低温系统的原因, 而且也因为它有着更高的谐振频率和场强水平^[1]。用高温超导材料制造加速腔面临着一些难题, 首先是很难制备大面积的高温超导材料; 其次是必须用金属做衬底, 以便有效地传热, 第三是腔形的优化问题。因此目前用高 T_c 谐振器建造粒子加速器的研究还处在起步阶段。日本高能加速器研究机构(KEK)和美国康奈尔大学都已经开展该领域的研究^[2], 并取得了一些初步的研究成果。

对高 T_c 谐振器微波特性的了解是其应用于加速器领域的前提, 而微波表面电阻和磁场穿透深度是其中最重要的两个特征参量。

1 高 T_c 超导平行板谐振器

平行板谐振器是由两片高温超导薄膜被介质层分开所构成的谐振结构, 它可以由在绝缘衬底两面分别生长高温超导薄膜组成, 也可以用两片生长好的超导薄膜相对扣在隔离绝缘介质片两面, 如图 1 所示。

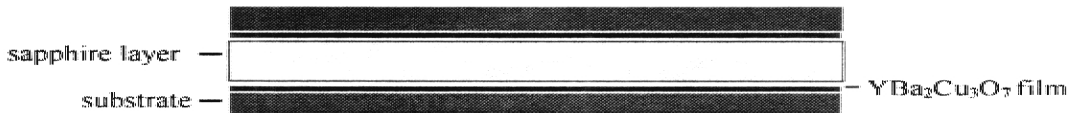


Fig. 1 Layout of the parallel plate resonator

图 1 平行板谐振器示意图

利用微波网络分析仪可以测量包括超导谐振器在内的系统的谐振频率和品质因数,

* 国家 863 激光技术领域基金资助课题

1998 年 9 月 27 日收到原稿, 1999 年 3 月 20 日收到修改稿。

杨志涛, 男, 1974 年 2 月出生, 在读硕士

根据所测结果就可以得到超导薄膜的微波表面电阻和穿透深度。平行板谐振器的谐振品质因数 Q 值由超导薄膜的表面电阻损耗、介质损耗与辐射漏损所决定, 谐振频率 f 和品质因数 Q 与平行板谐振器参数的关系式为^[3]

$$f^2 = \frac{c^2}{\epsilon K} \left[\left(\frac{n}{2L} \right)^2 + \left(\frac{m}{2W} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_s} + \alpha s + \tan \delta \quad (2)$$

式中, L 和 W 分别为谐振器的长度与宽度, s 为介质层的厚度, n 与 m 是谐振模 (TM_{nm0}) 的模指数, $Q_s = \pi \mu_0 f s / R_s$ 为无载品质因数, 而 K 是一个与相速度变化有关的因子。(2) 式右边中第一项表示超导薄膜表面电阻引起的损耗; 第二项表示辐射漏损, 假定漏损与超导薄膜面间距 s 成正比, 用因子 α 来表示; 第三项为介质损耗项, $\tan \delta$ 为损耗角正切。在一定的温度下, 改变介质片厚度并测出对应不同厚度的谐振品质因数 Q 的一组值, 就可以根据 (2) 式拟合出该温度下的表面电阻 R_s 的值。磁场穿透深度则可通过对由于超导体电感引起的相速度变化来得到, 设温度为 0K 时谐振频率和穿透深度分别为 $f(0)$ 和 $\lambda(0)$, 温度为 T 时谐振频率和穿透深度分别为 $f(T)$ 和 $\lambda(T)$, 超导薄膜厚度为 t , 则有^[4,5]

$$\frac{f^2(0)}{f^2(T)} - 1 = \frac{2\lambda}{s} \coth \frac{1}{\lambda(T)} - \frac{2\lambda(0)}{s} \coth \frac{t}{\lambda(0)} \quad (3)$$

在介质厚度 s 和超导薄膜厚度 t 已知的情况下, 测量出温度改变时谐振频率的漂移 Δf , 就可以根据超导二流体模型中有关穿透深度的理论, 结合 (3) 式拟合出 0K 时的穿透深度 $\lambda(0)$ 。

2 实验装置和测量结果^[6]

实验用的超导薄膜是用脉冲激光沉淀法制备氧化锆的 $YBa_2Cu_3O_7$, 其超导转变温度 T_c 为 86 0K, 薄膜厚度为 400nm。薄膜制作使用了北京大学物理系介观物理重点实验室的超导薄膜制备设备。本实验中所有测量均实现了程控操作, HP8757D 网络分析仪, HP8350B 扫频信号发生器, HP34401A 数字万用表以及 HP9000 微机组成了一个快速、方便的测量系统。它可以在动态测量中自动跟踪谐振频率的漂移、自动选取扫频带宽以提高谐振频率和品质因数的测量精度。

本实验中的谐振系统如图 2 所示。其中两片 $YBa_2Cu_3O_7$ 超导薄膜中间夹垫一片 10mm × 10mm 的蓝宝石薄片构成了一个平行板谐振器, 为了保证其处于一个相对稳定的温度场中, 将其置于一个热容量很大的紫铜块中间的小腔中, 小腔的两个边缘口再用两块挡板屏蔽住。平行板谐振器在铜腔中的固定由两根铜杆完成, 其中上面的铜杆有弹簧加载, 并且其上端与一个改装的螺旋测微器相连, 其下端通过光孔伸入铜腔; 下面的铜杆则是一根螺杆, 通过紫铜块上的螺孔旋入铜腔。我们采用硬同轴线来传输微波信号, 通过焊接在同轴线末端的微带探针对平行板谐振器进行信号的馈入和提取。两个微带探针和平行板谐振器共面放置, 让它们分别与后者两个相邻的角(电场最强处) 正对并且距离很近, 这样就可以比较有效地完成微波信号的馈入与提取, 显然这是一种电耦合的方法。

在微波测量中我们发现, 实际的谐振系统除了平行板谐振器外还包括超导薄膜与紫铜腔内表面之间形成的谐振。识别真正的超导谐振信号最直截了当的方法是取消置于两片超导薄膜之间的绝缘介质片, 使两片超导薄膜短路。这就在基本上不改变其它谐振体系的前提下, 使平行板谐振器失效。将这种情况下观测到的各个谐振峰与短路前的结果对比, 则消失的谐振峰

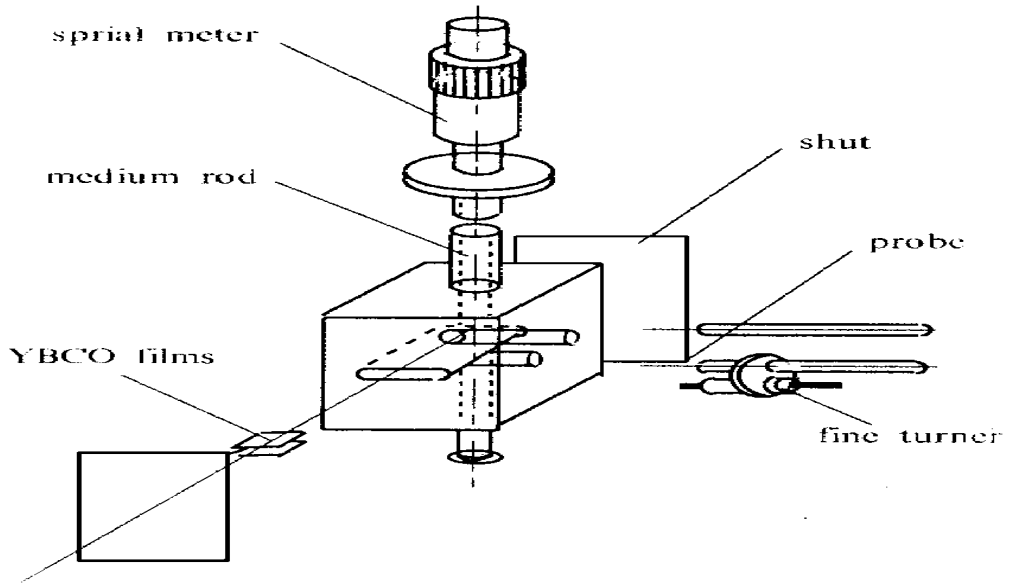


Fig 2 Layout of the resonating system

图 2 谐振系统示意图

就是平行板谐振器的谐振信号。确定真正的谐振信号时,还可以把各个谐振信号的谐振频率与理论值进行对照,表 1 给出了实验中观测到的超导谐振信号的多个模式。由于实验中所用蓝宝石的相对介电常数 $\epsilon_r = 9.5$, 所以实验结果与理论预期的结果符合的很好(由于谐振器的长和宽有微小差别,所以出现了双峰现象,即简并解除)。

表 1 平行板谐振器的多个谐振模式

Table 1 Several resonant modes of the parallel plate resonator

resonant mode	TM ₀₁₀	TM ₁₀₀	TM ₁₁₀	TM ₀₂₀	TM ₂₀₀	TM ₁₂₀	TM ₂₁₀	TM ₂₂₀
frequency/GHz	5.059	5.171	7.408	10.07	10.24	11.43	11.63	14.91

表 2 给出了一组超导平行板谐振器在温度 $T = 77\text{K}$ 时的无载 Q 值,以及 s 的测量数据^[6]。其中谐振模式为 TM₀₁₀, 理论上介质厚度并不影响谐振频率,从实际测量的结果也可以看出谐振频率基本上是相同的。根据这些数据,利用前面的式子可以拟合得到在液氮温度下 $\tan \delta = 2.55 \times 10^{-6}$, $\alpha = 6.63 \times 10^{-5}$, $R_s = 693 \mu\Omega$ 。

表 2 谐振频率和品质因数随蓝宝石厚度的变化

Table 2 Variance of the resonant frequency and the quality factor versus the thickness of sapphire

thickness of sapphire $s/\mu\text{m}$	resonant frequency f/GHz	quality factor Q
158	5.288	2134
273	5.237	2597
315	5.262	2744
425	5.283	2957
483	5.257	3042
515	5.276	3106

我们利用减压降温的方法,进行了超导转变温度 T_c (86.0K) 附近平行板谐振器的谐振频率和品质因数的变温测量,一共采集了 1600 个数据。图 3 和图 4 分别是基模谐振频率 f 和品

质因数 Q 随温度的变化曲线。

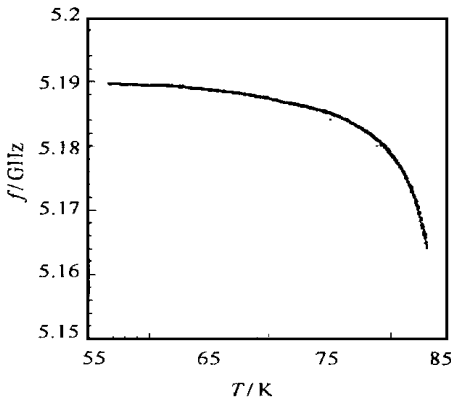


Fig 3 Resonant frequency vs temperature

图 3 谐振频率随温度的变化曲线

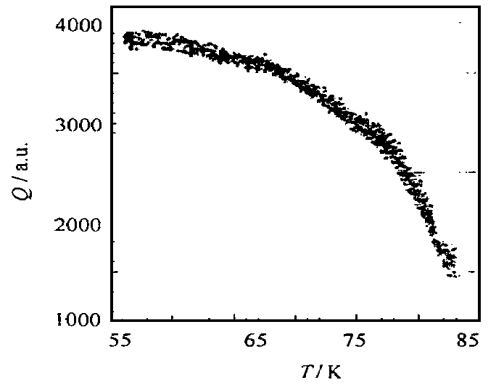


Fig 4 Quality factor vs temperature

图 4 品质因数随温度的变化

从图 4 中可以看出, 当温度从 56K 趋近于超导转变温度 T_c (86.0K) 时, Q 值降低得很快, 在 84K 左右已经很小并且波动很大, 为减小相对误差, 舍去了 84K 以后的点。根据测量数据以及前面拟合出的温度为 77K 时的表面电阻值, 得到这组超导薄膜样品的微波表面电阻 R_s 随温度的变化曲线, 如图 5 所示。

穿透深度则根据图 3 中谐振频率随温度的变化曲线来得出, 结合 (3) 式以及超导二流体模型的理论, 并且注意到实验中所用的高 T_c 超导薄膜厚度 $t = 400\text{nm}$, 蓝宝石介质厚度 $s = 158\mu\text{m}$, 可以拟合出超导薄膜的磁场穿透深度 $\lambda(0) = 290\text{nm}$, 如图 6 所示, 其中纵坐标为谐振频率的相对漂移值, 以 77K 温度下的谐振频率值为参考值。当取 $\lambda(0) = 290\text{nm}$ 时, 即图 6 中, 中间那条拟合曲线与实验曲线最为接近, 基本重合。在拟合过程中发现穿透深度的结果对于 T_c 值十分敏感, 这为超导薄膜 T_c 值的验证提供了一个思路。

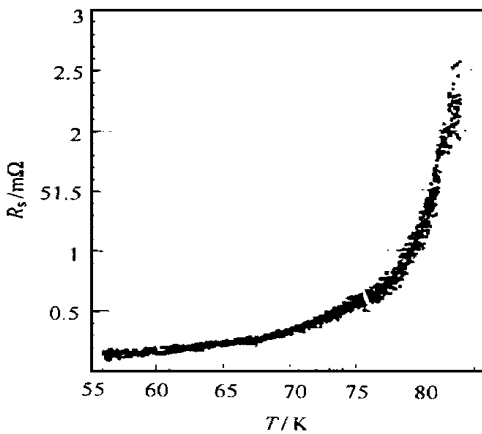


Fig 5 Surface resistance vs temperature

图 5 表面电阻随温度的变化

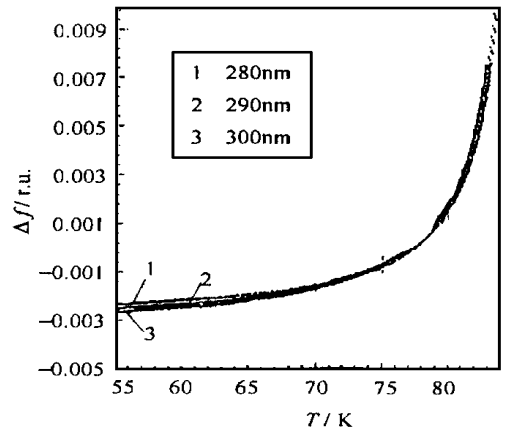


Fig 6 Fitted result of penetration depth

图 6 穿透深度的拟合曲线

3 结 语

前文曾提到将高 T_c 超导谐振器用于粒子加速器尚需解决一系列的难题, 研究其微波特性

只是其中第一步。实验过程中我们借鉴了一些比较先进的实验思想和方法,不断更新方案,改进技术,取得了比较满意的结果。其中磁场穿透深度的测量,在国内尚属首次。

平行板谐振器法用于高 T_c 谐振器微波特性的研究具有如下优点:首先,这种方法原理简单,技术上易行,不需庞大的设备、复杂的工序和繁琐的数据处理。其次,这种方法具有很大的灵活性和自由度,属于“开放”型设计,有利于实现技术上的更新,能适应不同的实验环境和实验内容。第三,这种方法并不局限于某一种特定的微波谐振模式,而且对超导薄膜样品不会造成任何损害。今后我们还将进行液氮温度(4.2K)下的变温实验。

参考文献

- 1 Muller G Proc of the 4th workshop of RF superconductivity. Tsukuba, 1990 267
- 2 Inagaki S, et al Microwave surface resistance of BiSrCaCuO thick films on large-area metallic substrates *J Appl Phys*, 1997, **36**: 3478
- 3 Taber R C A parallel plate resonator technique for microwave loss measurement on superconductors *Rev Sci Instrum*, 1990, **61**(8): 1873
- 4 Basovich Y A, et al Parallel-plate resonator of variable spacer thickness for accurate measurement of surface impedance of high- T_c films *Journal of Superconductivity*, 1992, **5**(6): 645
- 5 Taber R C, et al A method for accurate measurement of the complex conductivity of high- T_c superconductive thin films *Journal of Superconductivity*, 1992, **5**(4): 1025
- 6 Yang Z T, et al Research on microwave property of high- T_c superconductor: Proceedings of the first APAC, KEK, Japan, 1998

RESEARCH ON MICROWAVE PROPERTY OF HIGH- T_c SUPERCONDUCTIVE RESONATOR

YANG Zhi-tao, ZHAO Kui, WU Gen-fa, WANG Li-fang, ZHANG Bao-cheng, CHEN Jia-er
Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871

ABSTRACT: The microwave property of high- T_c superconductive resonator, especially the surface resistance and the magnetic field penetration depth were discussed. The value of them were measured and the relationship between surface resistance and temperature was also studied. The microwave system utilizes a parallel plate high- T_c superconductive resonator consisted of $YBa_2Cu_3O_7$ films and sapphire layer inside.

KEY WORDS: superconducting accelerator; high- T_c superconductive resonator, surface resistance; penetration depth