



中华人民共和国国家标准

GB/T 22586—2018
代替 GB/T 22586—2008

电子学特性测量 超导体在微波频率下的表面电阻

**Electronic characteristic measurements—Surface resistance of
superconductors at microwave frequencies**

(IEC 61788-7:2006, Superconductivity—Part 7: Electronic characteristic
measurements—Surface resistance of superconductors at microwave
frequencies, MOD)

2018-03-15 发布

2018-10-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 要求	1
5 装置	2
5.1 测试系统	2
5.2 R_s 测试腔体	2
5.3 介质柱	3
6 测试步骤	4
6.1 样品准备	4
6.2 系统构建	4
6.3 参考电平测试	5
6.4 谐振器频响特性的测试	5
6.5 超导薄膜的表面电阻 R_s 、标准蓝宝石柱的 ϵ' 和 $\tan\delta$ 的确定	6
7 测试方法的精密度和精确度	7
7.1 表面电阻	7
7.2 温度	8
7.3 样品和支撑结构	8
7.4 样品的保护	9
8 测试报告	9
8.1 被测样品的标识	9
8.2 R_s 值报告	9
8.3 测试条件报告	9
附录 A (资料性附录) 与第 1 章~第 8 章相关的附加资料	10
附录 B (规范性附录) 改进型镜像介质谐振器法	19
附录 C (资料性附录) 与附录 B 相关的附加资料	25
参考文献	28
图 1 使用制冷机测试 R_s 随温度变化特性的装置图	2
图 2 典型的 R_s 测试腔体示意图	3
图 3 $T(K)$ 温度下的插入损耗 IA , 谐振频率 f_0 和半功率点带宽 Δf	5
图 4 反射系数 (S_{11} 和 S_{22})	6
图 5 表 4 中术语的定义	8

图 A.1	各种测量微波表面电阻 R_s 方法结构示意图	10
图 A.2	两端由两片沉积在介质基片上的超导薄膜短路圆柱形介质谐振器的几何结构	12
图 A.3	TE _{01p} 模式的 $u-v$ 和 $W-v$ 关系的计算结果	13
图 A.4	测量 R_s 、 $\tan\delta$ 的标准介质柱的电磁场结构	13
图 A.5	三种形式的谐振器的结构示意图	14
图 A.6	设计平行超导薄膜两端短路的 TE ₀₁₁ 谐振器的模式图 ^[20]	15
图 A.7	设计平行超导薄膜两端短路的 TE ₀₁₃ 谐振器的模式图 ^[20]	16
图 A.8	闭合式 TE ₀₁₁ 谐振器的模式图	17
图 A.9	闭合式 TE ₀₁₃ 谐振器的模式图	18
图 B.1	测试系统示意图	19
图 B.2	典型的改进型镜像介质谐振器法谐振装置安装示意图	20
图 B.3	测试探头加载被测样品示意图	20
图 B.4	耦合结构示意图	21
图 B.5	金腔结构示意图	22
图 B.6	校准探头与测试探头装配良好时的牛顿环示意图	24
图 C.1	测试探头加载校准探头示意图	26
图 C.2	测试探头加载金属板示意图	27
图 C.3	测试探头加载超导样品示意图	27
表 1	12 GHz、18 GHz、22 GHz 时标准蓝宝石介质柱的典型尺寸	4
表 2	12 GHz、18 GHz、22 GHz 时超导薄膜的尺寸	4
表 3	矢量网络分析仪的参数	7
表 4	蓝宝石介质柱参数	8
表 B.1	耦合孔尺寸	21
表 B.2	蓝宝石介质柱的尺寸和加工要求	21
表 B.3	屏蔽腔各部分尺寸	22

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 22586—2008《高温超导薄膜微波表面电阻测试》。与 GB/T 22586—2008 相比，主要技术变化如下：

- 增加了附录 B(规范性附录)，给出了“改进型镜像介质谐振器法”应用“校准技术”测量单片高温超导薄膜微波表面电阻(R_s)的方案。本方案采用的是 $TE_{011+\delta}$ 模式改进型镜像蓝宝石介质谐振器法，通过校准，单片超导薄膜的 R_s 值可以通过一次测量得到。本方案在满足测量变异系数低于 20% 的前提下，能大幅度提高测试效率，适合大批量工业化的测试；
- 增加了附录 C(资料性附录)，给出了与附录 B 相关的一些附加资料，如“改进型镜像介质谐振器法”的理论推导等。

本标准使用重新起草法修改采用 IEC 61788-7:2006《超导电性 第 7 部分：电子学特性测量 超导体在微波频率下的表面电阻》，与 IEC 61788-7:2006 相比，主要技术性差异如下：

- 增加了规范性附录 B 及资料性附录 C。附录 B 是另一种供选择的方案。

本标准还做了下列编辑性修改：

- 本标准的名称中去掉了“超导电性 第 7 部分：”字样，以便与现有的标准系列一致。

本标准由中国科学院提出。

本标准由全国超导标准化技术委员会(SAC/TC 265)归口。

本标准起草单位：电子科技大学、清华大学、南京大学、中国科学院物理研究所。

本标准主要起草人：曾成、罗正祥、补世荣、魏斌、吉争鸣、孙亮。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 22586—2008。

引 言

自从一些钙钛矿结构铜氧化物发现以来,国际上对氧化物高温超导体开展了广泛的研究与开发工作,在高磁场设备、低损耗能量传输、电子学和许多其他技术领域的应用正在取得很大的进步。

在电子学的许多领域,特别是在通信领域,微波无源器件,例如超导滤波器,正在发展之中,并且已经进入现场试验阶段^[1,2]。

用于微波谐振器、滤波器、天线和延迟线的超导材料具有损耗非常低的优点。超导材料损耗特性对新材料的开发和对超导微波器件的设计,都非常重要。超导材料微波表面电阻 R_s 和表面电阻随温度的变化特性,是设计低损耗微波器件所需要的重要参数。

高温超导(HTS)薄膜的最新进展,即它的 R_s 值比一般金属低几个数量级,增加了对该特性进行可靠测量技术的需求^[3,4]。传统测量铌和其他低温超导材料 R_s 的方法是:用被测材料制作一个三维谐振腔,测试其 Q 值,通过计算电磁场在腔内的分布可以求得 R_s 值。另外一种技术是在一个较大的腔体内放入一个小样品。这种技术有许多形式,但是由实验测得的腔体总损耗计算高温超导薄膜的损耗时,通常都包含了所引入的不确定度。

最好的高温超导薄膜是生长在平坦单晶衬底上的外延薄膜,到目前为止,在弯曲表面上还未能生长出高质量的薄膜。对高温超导薄膜 R_s 测量技术的要求是:可以用小的平坦的样品;不需要对样品做任何加工;不会损坏或改变样品;高重复性;高灵敏度(低至铜表面电阻的千分之一);动态范围大(高至铜的表面电阻);中等功率输入时可激励高的内部功率;温度变化范围宽(4.2 K~150 K)。

在数种确定微波表面电阻的方法^[5,6,7]中,我们选择了介质谐振器法,因为到目前为止,这种方法是最受欢迎和最实用的。特别是,蓝宝石谐振器是一种测试高温超导材料微波表面电阻 R_s 的极好工具^[8,9]。由于改进型镜像介质谐振器法具有直接测试单片超导薄膜微波表面电阻的能力,且其测量变异系数与双介质谐振器法相当,这种方法也是我们推荐的,因此本标准将其作为一种替代方法在附录 B 中给出。

本标准给出的测试方法也可应用于包括低临界温度材料在内的其他平板状超导块材。

本标准目的是给目前在电子学和超导体技术领域工作的工程师,提供一个适当的、得到认可的技术。

本标准涵盖的测试方法是建立在 VAMAS(凡尔赛先进材料和标准项目)确定超导薄膜特性预标准化工作的基础之上的。

电子学特性测量

超导体在微波频率下的表面电阻

1 范围

本标准规定了在微波频率下利用双谐振器法测试超导体表面电阻的方法,测试目标是在谐振频率下 R_s 随温度的变化。改进型镜像介质谐振器法,作为另外一种可选用的方法,在附录 B 中给出。

本标准适用于表面电阻的测试范围如下:

- 频率: $8 \text{ GHz} < f < 30 \text{ GHz}$;
- 测试分辨率: $0.01 \text{ m}\Omega (f = 10 \text{ GHz})$ 。

测试报告给出在测试频率下的表面电阻值,并且给出利用 $R_s \propto f^{-2}$ 的关系折合到 10 GHz 的值。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60050-815 国际电工术语 超导电性 [International electrotechnical vocabulary (IEV)—Part 815: Superconductivity]

3 术语和定义

IEC 60050-815 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

表面阻抗 surface impedance

Z_s

导体(包括超导体)表面电场切向分量 E_t 与磁场切向分量 H_t 之比:

$$Z_s = E_t / H_t = R_s + jX_s$$

式中:

R_s ——表面电阻;

X_s ——表面电抗。

4 要求

给加载超导薄膜样品的介质谐振器输入微波信号,通过测试介质谐振器在不同频率下的衰减可得到超导薄膜表面电阻 R_s 。测试频率在谐振频率中心附近扫描,记录下衰减频响特性可得到与损耗相关的 Q 值。

当测试温度在 $30 \text{ K} \sim 80 \text{ K}$ 之间时,这种方法的目标精密度,即变异系数(定义为标准偏差除以表面电阻平均值)低于 20% 。

为了保证测试者的安全和健康,使用前应建立适当的安全措施,并做一些限制。

这种类型的测试存在一定的危险。测试需要使用制冷设备对超导体进行冷却,使其处于超导态。皮肤和冷腔体的直接接触,与液氮溅落在皮肤表面上一样,都会迅速引起冻伤。射频信号发生器是测试