

中华人民共和国国家标准

GB/T 46973—2026

微波无源器件用高温超导薄膜技术规范

Technical specifications for high temperature superconducting thin films of
microwave passive devices

2026-01-28 发布

2026-08-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国超导标准化技术委员会(SAC/TC 265)归口。

本文件起草单位：天津海芯电子有限公司、中国科学院物理研究所、电子科技大学、松山湖材料实验室、南开大学、中国电子科技集团公司第十六研究所。

本文件主要起草人：季来运、孙延东、高泽宇、吴云、杨景婷、曾成、陶伯万、季鲁、徐友平。



微波无源器件用高温超导薄膜技术规范

1 范围

本文件规定了微波无源器件用高温超导薄膜的技术要求、包装、标志、运输和贮存,描述了相应的试验方法。

本文件适用于超导材料学领域微波无源器件应用的高温超导薄膜。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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。

- GB/T 14140 半导体晶片直径测试方法
- GB/T 17711 钇钡铜氧(123 相)超导薄膜临界温度 T_c 的直流电阻测试方法
- GB/T 22586 电子学特性测量 超导体在微波频率下的表面电阻
- GB/T 28786—2012 真空技术 真空镀膜层结合强度测量方法 胶带粘贴法
- GB/T 30857 蓝宝石衬底片厚度和厚度变化测试方法
- GB/T 33826 玻璃衬底上纳米薄膜厚度测量 触针式轮廓仪法
- GB/T 36969 纳米技术 原子力显微术测定纳米薄膜厚度的方法
- GB/T 39843—2021 电子学特性测量 大面积超导膜的局域临界电流密度及其分布

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超导薄膜 **superconducting thin film**

生长于特定基底材料上的平均厚度小于 $1\ \mu\text{m}$ 的薄层超导体。

注 1: 基底材料通常为单晶材料。

注 2: 超导薄膜通常用物理气相沉积法、化学气相沉积法或其他工艺制备。

3.2

临界温度 **critical temperature**

T_c

在零电流和零磁场强度下,超导体呈现超导电性的最高温度。

[来源:GB/T 2900.100—2017,815-10-09]

3.3

临界电流密度 **critical current density**

J_c

通过导体的电流为临界电流时,导体全截面上的电流密度。

[来源:GB/T 2900.100—2017,815-12-03,有修改]

3.4

表面电阻 surface resistance

R_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 之比的实部即为表面电阻 R_s ：

$$R_s = \operatorname{Re}\left(\frac{E_t}{H_t}\right) = Z_s - jX_s$$

式中：

R_s ——表面电阻；

Z_s ——表面阻抗；

X_s ——表面电抗。

3.5

复数介电常数 complex permittivity

复数介电常数 $\dot{\epsilon}$ 为：

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'')$$

式中：

ϵ_r ——复数相对介电常数；

ϵ_0 ——真空介电常数,其值为 8.854×10^{-12} F/m；

本文件所述及的复数介电常数实际上均指相对介电常数,并以相对介电常数的实部 ϵ' 和介电损耗角正切 $\tan\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ 表征之。

[来源:GB/T 5597—1999,第2章]

4 超导薄膜分类

超导薄膜根据超导层材料的不同可分为以下两类：

——钇系超导薄膜(REBCO)；

——铌系超导薄膜(TBCCO)。

其细节详见附录 A,结构详见附录 B。

5 要求

5.1 临界温度

按照 6.1 中规定的方法测试,超导薄膜的临界温度(T_c)应不低于 77 K。

5.2 临界电流密度

按照 6.2 中规定的方法测试,超导薄膜的临界电流密度(J_c)应不低于 1.0 MA/cm^2 (@77 K, 0 T)。

5.3 微波表面电阻

按照 6.3 中规定的方法测试,超导薄膜的微波表面电阻(R_s)应不大于 $1.0 \text{ m}\Omega$ (@77 K, 10 GHz)。

注：在微波频率下测得的表面电阻值即为超导薄膜的微波表面电阻。

5.4 基底直径

按照 6.4 中规定的方法测试,超导薄膜的基底直径测量偏差应不大于 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

5.5 基底厚度及均匀性

按照 6.5 中规定的方法测试,超导薄膜的基底厚度偏差应不大于 ± 0.05 mm,基底厚度均匀性偏差应不大于 ± 0.01 mm。

5.6 超导层厚度和金层厚度

按照 6.6 中规定的方法测试,超导层厚度应不小于 200 nm,金层厚度应不小于 100 nm,订购方另有约定的除外。

5.7 超导薄膜均匀性

超导薄膜的均匀性以临界电流密度的分布数值作为依据,每 10 mm \times 10 mm 面积上至少测试一个点,按照 6.2 中规定的方法测试,偏差应不大于平均值的 $\pm 20\%$ 。

5.8 金层与超导层的结合强度

按照 6.7 中规定的方法测试,金层和超导层的结合强度应满足 GB/T 28786—2012 中表 A.1 中的第 4 个级别。

5.9 外观

按照 6.8 中规定的方法测试,超导薄膜的表面应无裂纹、划痕、污渍和其他缺陷。

6 测试方法

6.1 临界温度

超导薄膜的临界温度按照 GB/T 17711 规定的方法进行测试。

6.2 临界电流密度

超导薄膜的临界电流密度按照 GB/T 39843—2021 中第 6 章规定的方法进行测试。

6.3 微波表面电阻

超导薄膜的微波表面电阻按照 GB/T 22586 规定的方法进行测试。

注:超导薄膜的微波表面电阻的测试是在超导层完成后,镀金之前进行。

6.4 基底直径

超导薄膜基底直径按照 GB/T 14140 规定的方法进行测试。

6.5 基底厚度及均匀性

超导薄膜的基底厚度按照 GB/T 30857 规定的方法进行测试,基底厚度的均匀性以基底的五点厚度测试数据作为依据。

注:基底厚度的测试在超导薄膜制备之前进行。

6.6 超导层厚度和金层厚度

超导层厚度和金层厚度按照 GB/T 33826 或者 GB/T 36969 规定的方法进行测试。

6.7 金层与超导层结合强度

金层与超导层结合强度的测试区域宜不小于 10 mm×10 mm,按照 GB/T 28786—2012 中第 7 章和第 8 章规定的方法进行测试。

6.8 外观

宜用 60 W~100 W 的磨砂白炽灯或两根 15 W 的冷白荧光灯照射超导薄膜表面,眼睛到超导薄膜的观察距离不超过 450 mm,在黑色背景下借助反射光进行目视检查。如有规定时,可使用 4 倍~10 倍放大镜进行检查。

7 包装、标志、运输和贮存

7.1 包装

包装宜使用专用晶圆盒。包装时应保持干燥、避免接触腐蚀性化学试剂和注意减振。
运输过程中的包装宜采用真空封装。

注：减振是避免硬物挤压到产品。

7.2 标志

产品包装上应包含以下信息：

- 生产厂商名称；
- 产品名称；
- 产品类别；
- 产品规格；
- 产品数量；
- 生产日期；
- 易碎标签；
- 防潮标识。

产品包装上可包含以下信息：

- 生产厂商的商标；
- 生产厂商的联系方式；
- 产品批号；
- 产品产地；
- 使用说明。

注：需要标注的其他技术信息，详见附录 C。

7.3 运输

在运输过程中应注意减振并保持干燥，避免运输过程中受潮。

7.4 贮存

超导薄膜贮存时应保持干燥并避免被腐蚀性化学试剂污染或腐蚀。

长期贮存宜使用干燥瓶或干燥柜，贮存的环境相对湿度宜不超过 30%，温度宜不高于 45℃。

注：长期贮存是指生产日期后的 48 h 内不开封保存。

附录 A
(资料性)

微波无源器件用高温超导薄膜分类

A.1 超导薄膜分类概述

根据超导层材料的不同,超导薄膜通常分为钇系超导薄膜和铋系超导薄膜。其他未包含于上述种类中的超导薄膜在未来能够满足微波无源器件的使用要求时,也可参照本附录执行。

A.2 钇系超导薄膜

钇系超导薄膜主要是以 YBCO 为代表的、分子式为 $REBa_2Cu_3O_7$ 的超导薄膜(RE 为 Y 和镧系 La、Nd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 和 Lu 等元素),常见的有钇钡铜氧(YBCO)和镱钡铜氧(DyBCO)超导薄膜。一种典型钇系超导薄膜的构成见表 A.1,包括氧化镁(MgO)、铝酸镧($LaAlO_3$)、蓝宝石(Al_2O_3)、钛酸锶($SrTiO_3$)、铝酸锶钽镧(LSAT)等基底材料,氧化物薄层例如 CeO_2 等的过渡层(根据需要),超导层(例如 YBCO、DyBCO 等)和金层,即基底、过渡层、超导层和金层共同组成一片完整的超导薄膜。基底和过渡层是超导层生长的关键,金层为超导薄膜提供保护和电接触。

钇系超导薄膜临界温度可达液氮温区,有比较好的物理和化学稳定性,是当前应用最广泛的高温超导材料。镱钡铜氧(DyBCO)超导薄膜,化学稳定性更好,对外界潮湿和化学腐蚀的抵抗性更强,临界温度比钇钡铜氧(YBCO)大约高 2 K。

表 A.1 钇系超导薄膜(REBCO)构成

构成	材料
基底	氧化镁(MgO)、铝酸镧($LaAlO_3$)、蓝宝石(Al_2O_3)、钛酸锶($SrTiO_3$)、铝酸锶钽镧(LSAT)等
过渡层	氧化铈(CeO_2)等
超导层	钇钡铜氧(YBCO)、镱钡铜氧(DyBCO)等
金层	金(Au)

A.3 铋系超导薄膜

铋系超导薄膜(TBCCO)是由铋、钡、钙及铜的氧化物合成制得的不含稀土元素的高温超导体,是一类临界温度比较高的超导薄膜,化学式 $Tl_2Ba_2Ca_{m-1}Cu_mO_{2m+4}$ 和 $TlBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+3}$ ($m=1,2,3,4$; $n=1,2,3,4,5$)。一种典型铋系超导薄膜构成见表 A.2,包括氧化镁(MgO)、铝酸镧($LaAlO_3$)、蓝宝石(Al_2O_3)、钛酸锶($SrTiO_3$)、铝酸锶钽镧(LSAT)等基底材料,氧化物薄层例如 CeO_2 等的过渡层(根据需要),超导层(TBCCO)和金层,即基底、过渡层、超导层和金层。基底和过渡层是超导材料生长的关键,金层为超导薄膜提供保护和电接触。

常见的铋系超导薄膜有四种:Tl-2212、Tl-2223、Tl-1223、Tl-1212,临界温度在 100 K 以上。

表 A.2 铌系超导薄膜(TBCCO)构成

构成	材料
基底	氧化镁(MgO)、铝酸镧(LaAlO ₃)、蓝宝石(Al ₂ O ₃)、 钛酸锶(SrTiO ₃)、铝酸锶钽镧(LSAT)等
过渡层	氧化铈(CeO ₂)等
超导层	铌钡钙铜氧(TBCCO)
金层	金(Au)



附录 B
(资料性)

微波无源器件用高温超导薄膜结构

B.1 总则

专业技术人员可通过材料的选择和镀膜工艺的改进,来满足各种微波无源器件所需超导薄膜的指标要求。超导薄膜具有较为复杂的内部结构,其组成包括基底材料、过渡层、超导层和金层。超导薄膜的功能组分和结构分别在 B.2 和 B.3 中进行阐述。超导薄膜通过选用不同的基底及超导材料,可获得不同的超导特征和特性,详细描述参见附录 A。根据微波无源器件实际应用需求,超导薄膜的结构形式可为单面超导薄膜或双面超导薄膜,可包含或不包含金层。微波无源器件用高温超导薄膜应用的其他辅助性信息详见附录 C。

B.2 超导薄膜功能组分

B.2.1 基底材料

通常,基底材料以氧化镁(MgO)、铝酸镧(LaAlO₃)、蓝宝石(Al₂O₃)、钛酸锶(SrTiO₃)、铝酸锶钽镧(LSAT)为主。基底材料不同,其复数介电常数不同,可满足不同指标要求的微波无源器件应用。基底材料的直径 25.4 mm~101.6 mm 不等,基底材料厚度 0.2 mm~1.0 mm 不等。基底材料对超导层有多重功能,包括机械支撑、外延生长等。

注: 1 英寸=25.4 mm。

B.2.2 过渡层

过渡层可解决基底材料与超导层之间的晶格失配问题,减少基底材料和超导层之间的原子扩散,增加超导层与基底之间的结合力,提高超导薄膜的性能和稳定性。如先在基底材料上镀一层 CeO₂,然后再镀超导层来提高超导层的性能和结合力。根据超导层的材料、基底材料和制备工艺的不同,可选择是否需要过渡层。

B.2.3 超导层

通过选用不同的超导材料,以获得不同特性和特征的超导薄膜。各种超导层的细节在附录 A 中有更详细的描述。

B.2.4 金层

超导薄膜的超导层外通常镀金层,用来提供电接触,同时可为超导层提供保护,避免因外界污染而损坏。

B.3 超导薄膜结构

典型的双面超导薄膜结构示意图见图 B.1,典型的单面超导薄膜结构示意图见图 B.2。为了更好地体现结构特点,图中基底直径与厚度、各层的相对厚度并没有按实际比例绘制。

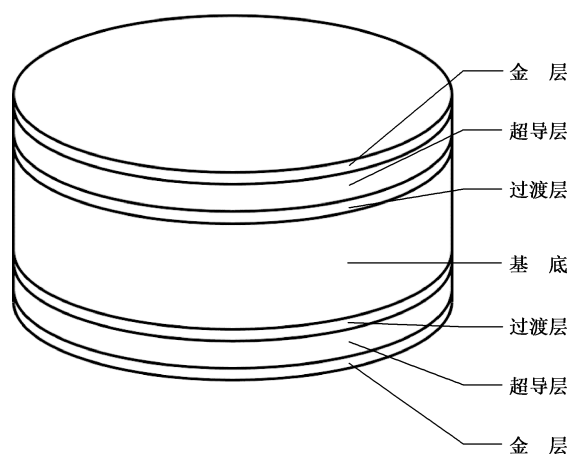


图 B.1 双面超导薄膜结构示意图

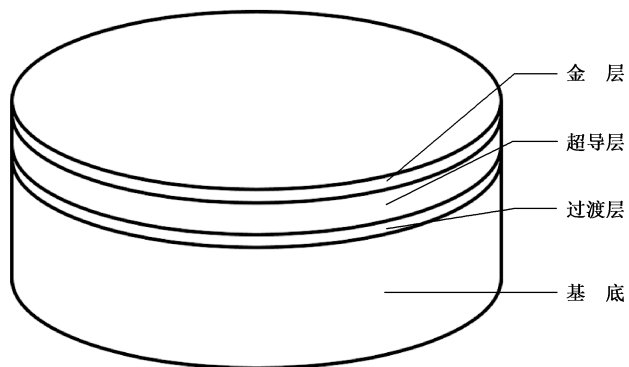


图 B.2 单面超导薄膜结构示意图

附 录 C

(资料性)

辅助微波无源器件用高温超导薄膜规范和使用技术信息

C.1 总则

签署合同或订单时,技术条件可从下列资料中选取,具体选取哪些条目由实际应用情况决定。每一条目的技术含义见附录 A 和附录 B。

C.2 产品参数

可给出产品参数如下:

- 组成材料,包括超导层材料、过渡层材料、基底材料;
- 内部结构特点,包括超导层厚度、过渡层厚度;
- 是单面超导膜或双面超导膜;
- 是否需要镀金,并给出金层的厚度;
- 基底直径及公差;
- 基底厚度及公差。

C.3 质量保证

超导薄膜特性包括临界温度、临界电流密度、微波表面电阻、基底的复数介电常数、基底的直径、基底的厚度及均匀性、超导层厚度、金层厚度、超导薄膜均匀性、金层与超导层的结合强度、外观等。

其中临界温度是超导薄膜本身的特性,复数介电常数是基底材料的本身特性。

临界温度、超导层厚度、金层厚度、金层与超导层的结合强度等属于损伤性测量,微波表面电阻的测量需要在镀金之前进行。

除非用户和供应商另有约定,以下这五种特性非必要不测量,临界温度、超导层厚度、金层厚度、金层与超导层的结合强度、微波表面电阻。

一般而言,超导薄膜的使用温度通常低于其临界温度。

C.4 检验

除非合同或采购订单另有规定,供应商可负责进行规定的所有检验和测量。

除非用户和供应商另有约定,可在每批超导薄膜中取样,以验证超导薄膜是否符合本文件中所罗列的各种性能指标要求。

C.5 技术记录

根据合同或采购订单的要求,可在包装中另附技术记录,技术记录内容见 C.2 和 C.3。

参 考 文 献

- [1] GB/T 2900.100—2017 电工术语 超导电性
 - [2] GB/T 5597—1999 固体电介质微波复数介电常数的测试方法
-

