

用于射频传输线制备的 YBCO 薄膜 工艺开发与特性研究*

田清文¹⁾²⁾ 原蒲升^{2)†} 余慧勤²⁾ 汪书娜²⁾
刘晓宇²⁾ 李凌云²⁾ 尤立星^{2)‡}

1) (上海大学微电子学院, 上海 201800)

2) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2024 年 11 月 12 日收到; 2024 年 12 月 11 日收到修改稿)

本文介绍了一种由超导带材机械冷剥离薄膜制备共面波导柔性传输线的工艺方法. 剥离加工后的 YBCO 薄膜超导转变温度宽度为 0.79 K, 相较于原带材的转变宽度升高了 0.3 K, 在 77 K, 0 T 下临界电流密度为 7.7×10^5 A/cm², 具有带材 75% 以上的临界电流密度. 将剥离的 YBCO 薄膜制成长 12 cm、宽 1 cm PI-YBCO-PI 三层结构的传输线, 测得 40—4.2 K 的漏热值为 0.238 mW. 在 1 cm 宽的 YBCO 薄膜上制备 5 条信号通道, 仿真得相邻信号通道间的串扰小于 -40 dB, 每条通道在 9 GHz 处的插损小于 -2 dB, 每条信号通道的漏热值为 47.6 μ W.

关键词: YBCO 薄膜, 柔性传输线, 跨温区互连

PACS: 74.25.F-, 74.25.-q, 41.20.-q

CSTR: 32037.14.aps.74.20241583

DOI: 10.7498/aps.74.20241583

1 引言

在低温电子学领域的跨温区互连技术中^[1,2], 为了保证信号的高保真度, 需要传输线对信号的衰减、色散和串扰都尽可能小. 随着跨温区互连系统向着多通道发展, 例如 64 通道的单光子探测器 (SNSPD)^[3], 1000 量子比特的量子计算机系统^[4], 对传输线的插损和漏热提出了更高的要求. 超导传输线的出现, 为跨温区互连提供了更多的解决方案, 能运用于更多通道数、更低温区和更高速的信号传输中^[5]. 在正常态, 超导可以视为有耗金属, 传输系数较低, 当样品进入超导态并接近超导转变温度时, 超导材料可以支持等离子激元的激发, 此时样品具有最大的传输系数, 当温度进一步降低, 材料

可以认为是理想导体^[6]. 当前多数超导传输线用于 4.2 K—mK 的信号传输^[7,8], 需要在低温端 4.2 K 处加入低温放大器^[9]来确保信号的完整性. 由于制冷机系统在 40 K 以上的温区相对 4.2 K 温区能够提供更大的冷量且有更高能效比, 若把信号传输到 40 K 以上温区, 将功耗较大的有源放大器件放置在这个温区对信号进行放大, 整个跨温区互连系统不仅能够确保高速传输要求而且能够提升系统的能效. 例如 Bluefors XLD400 DR 稀释制冷机能够在 50 K 以 20% 容量满足对具有 150 条射频线路的 50 量子比特处理器的运行^[10]. 当前 40—4.2 K 的信号传输多采用金属传输线的方案^[11], 由于 Wiedemann-Franz 定律的限制, 金属传输线在具有低插损时, 会有较高的漏热值. 但超导传输线能够在超导态时解耦插损与漏热的联系而不受 Wiede-

* 上海科技启明星基金 (批准号: 22YF1456500) 和中国科学院技术支撑人才项目 (2022) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: psyuan@mail.sim.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: lxyou@mail.sim.ac.cn

mann-Franz 定律的限制, 因此采用一种超导转变温度高于 40 K 的材料制作超导传输线能够将信号以较小的插损和漏热传输到 40 K 甚至更高温度区. 近几年来, 高温超导材料 YBCO 应用广泛, 例如高温超导滤波器等^[12], 证明了 YBCO 在液氮温度区时具有良好的超导性能, 所以把 YBCO 材料用于 40—4.2 K 温度区互连的研究是合理的. 例如在 2017 年 Brookhaven 公司第 1 次从基带上剥离出 YBCO 薄膜^[13], 并在 2019 年基于剥离的 YBCO 薄膜进行了多丝电缆的制作^[14], 在 2021 年第 1 次提出“YBCO-Kapton”技术(把剥离的 YBCO 薄膜转移到 PI(聚酰亚胺)上进行柔性波导和微带线的制作^[15]), 并在 2023 年欧洲超导会议上展示了该项技术所制传输线的低无源损耗和低衰减特性, 是现今 40—4.2 K 温度区信号传输的有效方案^[16]. Brookhaven 公司采用电磁加热超导带材剥离 YBCO 薄膜, 该方法较为复杂且可能引起 YBCO 薄膜中氧组分的变化. 本文采用一种更快捷、方便的机械冷剥离 YBCO 薄膜方法, 获取的 YBCO 薄膜超导传输特性无显著退化, 在 PI-YBCO 结构的基础上, 保留了 YBCO 表面部分银层, 并把结构调整为 PI-YBCO-PI, 提高了该传输线的机械强度, 确保该传输线不会因为弯曲而损坏; 且对该结构传输线进行了漏热值测试, 测试结果表明该结构的传输线具有远低于传统金属传输线的漏热值.

2 工艺制作

2.1 YBCO 薄膜剥离过程

剥离是为了将有用材料层从基底上分离, 是许

多工业技术的基石. 例如从绝缘体上剥离硅, 将大量氢注入衬底, 形成氢泡, 氢气引起的开裂有助于剥离^[17]; 或剥离石墨, 将 FeCl_3 插层石墨 ($\text{FeCl}_3\text{-GIC}$) 与 H_2O_2 (30%) 混合实现天然石墨的电化学室温剥离^[18]; 对于过度金属二硫化物的剥离, 如 MoS_2 则可以通过电磁波与材料内极性分子之间的相互作用, 导致快速局部加热, 引发材料内部的热应力和膨胀, 导致 MoS_2 的分离^[19]. 材料的常用剥离方法可以大致分为化学剥离、液相剥离、电磁加热剥离和机械剥离, 其中化学剥离和液相剥离不适用于 YBCO 薄膜的剥离, 无论是化学剥离中注入离子、超声等步骤, 还是液相剥离中添加水作溶剂等操作都会对 YBCO 薄膜造成不可逆的损害. 电磁加热剥离已被证实能够剥离 YBCO 薄膜^[13], 但该过程中电磁加热可能会引起 YBCO 薄膜中氧组分变化而导致超导性能的损伤. 事实上, 正如图 5(c), (d) 中所展示的 YBCO 表面扫描电子显微镜 (SEM) 照片, YBCO 成颗粒状, 这种晶粒结构的形成是因为 YBCO 具有高度的各向异性, 而 ab 方向上的生长速度是 c 方向的 10 倍, 因此衬底与 YBCO 之间很少或没有化学键, 导致 YBCO- CeO_2 界面附着较弱^[20]. 所以本文采用了机械剥离的方法, 不同于电磁加热方法中较为繁琐的剥离步骤, 机械剥离能够在常温下直接从带材上剥离 YBCO 薄膜. 对于各种沉积 YBCO 薄膜的方法, 在金属有机沉积 (MOD) 过程中, YBCO 在基底的成核密度最小, 相对应与基底的结合力最弱, 更为方便剥离^[20]. 图 1 所示为整个剥离过程, 图 1(a) 是 YBCO 带材的结构和横截面示意图, 为了使 YBCO 薄膜能够顺利从基底剥离, 需要将带材两侧进行裁剪, 使得铜保

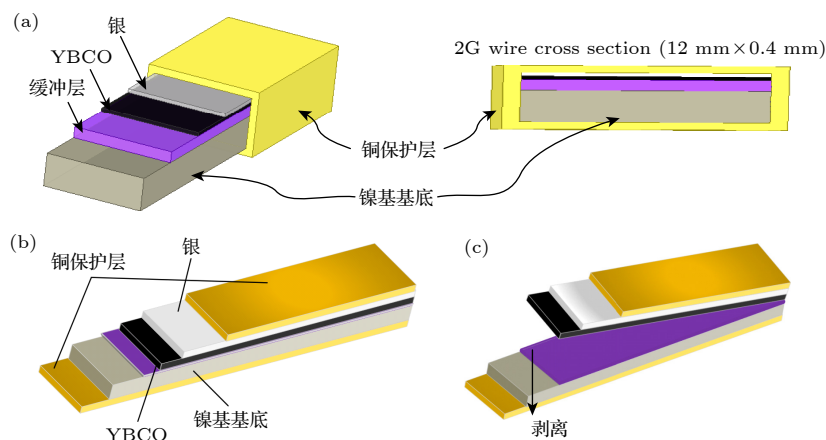


图 1 (a) 带材整体结构示意图; (b), (c) YBCO 薄膜剥离步骤

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the overall structure of the strip; (b), (c) steps for exfoliating YBCO thin film.

护层上下断开, 如图 1(b) 所示. 然后把需要剥离部分的 1—2 cm 悬空, 其余部分固定, 并向下弯曲基底, 悬空部分的 YBCO 薄膜与基底分离. 连续重复上述操作, 可以在常温下得到任意长度的 YBCO 超导薄膜 (带有铜层和银层), 如图 1(c) 所示.

图 2(a) 是剥离的镍基基底, 图 2(b), (c) 为剥离的镍基基底的光学显微镜图片. 根据图片显示, YBCO 从基底上完全脱落, 图 2(b) 中存在极少地方为黄色, 是由于部分缓冲层会随着 YBCO 一起脱离, 没有残留的 YBCO 留在镍基基底. 表明机械冷剥也能完全剥离 YBCO 薄膜, 该加工过程无需给薄膜电磁加热, 从而降低因加热可能引起的 YBCO 薄膜中氧组分变化.

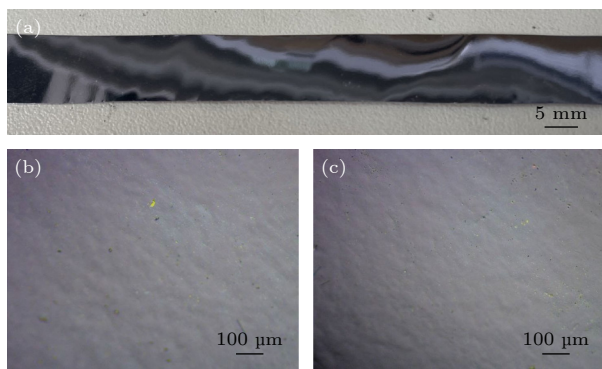


图 2 (a) 脱落的镍基基底; (b), (c) 光学显微镜下的镍基表面

Fig. 2. (a) Nickel based substrate; (b), (c) nickel based surface under optical microscope.

2.2 基于 YBCO 薄膜的微桥器件制作工艺流程

利用图 1(c) 步骤中剥离的 YBCO 薄膜制作微桥器件, 用于测量剥离 YBCO 薄膜的临界电流密

度. 如图 3(a) 所示, 把带铜、银的 YBCO 薄膜粘到 PI 上, YBCO 层朝下, 铜层位于顶层. 通过 83% 的 FeCl_3 酒精溶液腐蚀铜层, 铜层的厚度不同, 腐蚀时间也会不同, 但由于其 YBCO 薄膜上还存在银层, YBCO 不会暴露在溶液中, 该步骤对 YBCO 薄膜的超导性能几乎没有影响; 氨水和双氧水的混合溶液 (1:4) 腐蚀银层, 腐蚀银的最佳温度为 5—25 °C^[21]. 在该温区下, 经多次实验证明, 腐蚀 1 μm 厚的银层, 最佳时间为 10 s, 此时银层刚好完全反应. 得到如图 3(b) 所示的样品. 图 3(c) 展示了 10 mm×10 mm 的硅片作为衬底、把图 3(b) 所示的样品粘于硅片上进行微桥器件制作, 同时需要沿硅片的边缘对 YBCO 薄膜裁剪, 使得在后续曝光过程中, 仪器能够边缘定位, 防止曝光失败. 图 3(d) 为裁剪完成后的样品、随后步骤: 涂胶、曝光、显影、刻蚀制作微桥器件. 因 YBCO 薄膜较厚 (1 μm), 采用离子束刻蚀对 YBCO 超导性能影响较大, 且计算临界电流密度是根据制作完成后的微桥宽度, 对刻蚀精度要求较低, 湿法刻蚀使用的设备更为简单、操作更为方便, 所以采用湿法刻蚀的方法. YBCO 腐蚀溶液采用 1% 的 HCl 溶液.

2.3 PI-YBCO-PI 结构漏热样品制作工艺流程

漏热样品的制作: 剥离 12 cm 以上 (为了连接制冷机一级与二级冷台) 的 YBCO 薄膜粘于 PI 上, 铜层朝外, YBCO 位于底层. 通过上述腐蚀金属层的方法对铜层和银层进行腐蚀. 由于 YBCO 的物理特性, 导致 YBCO 薄膜在大幅度弯曲的情况下容易损坏, 所以为了保证漏热样品能具有良好

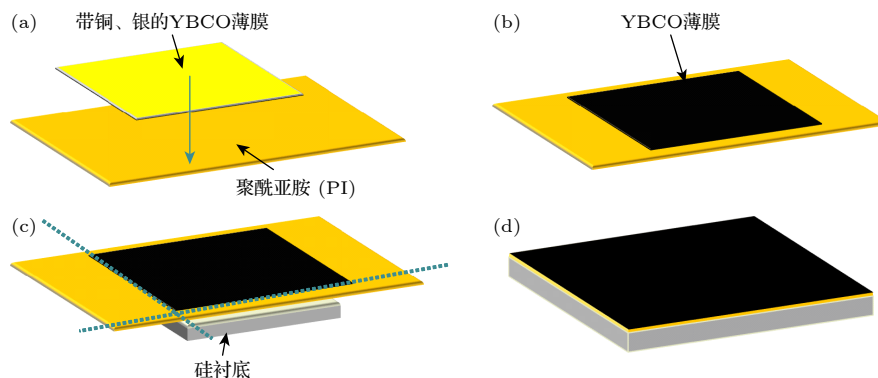


图 3 (a) 剥离的 YBCO 薄膜粘于 PI; (b) 腐蚀铜层、银层后的 YBCO 样品; (c) 腐蚀后的 YBCO 薄膜粘于硅片; (d) 裁剪完成后的样品

Fig. 3. (a) Exfoliated YBCO film and stick it to PI; (b) YBCO samples after corrosion of copper and silver layers; (c) corrosion induced YBCO thin film adhered to silicon wafer; (d) sample after cutting is completed.

的机械强度,只腐蚀了 YBCO 上的部分银^[21],即腐蚀掉两端和中间的银,确保接头不会与银接触,银层中间断开,从而使得银层不会把热量直接从 40 K 传递到 4.2 K;并在腐蚀完成的样品表面贴一层 PI 进行封装,提升样品机械强度的同时,让 YBCO 不会裸露在空气中,如图 4 所示.在完成样品制备后,将对获得的 YBCO 薄膜的超导传输特性和漏热特性进行测量和表征.



图 4 漏热样品实物图

Fig. 4. Physical picture of heat leakage sample.

漏热样品的制作共进行了 4 次,第 1 次为 10 条 10 cm 的 YBCO 薄膜漏热样品,第 2 次为 10 条 12 cm 的 YBCO 薄膜漏热样品,第 3 次为 15 条 15 cm 的 YBCO 薄膜漏热样品.第 4 次为 15 条 15 cm 的 YBCO 漏热薄膜样品.每次实验都能够快速、便捷地剥离 YBCO 薄膜,证明该剥离方法是可重复且可靠的.但在后续制作过程中,因腐蚀掉了铜层和部分银层,漏热样品在大幅度弯曲的情况下, YBCO 薄膜易断裂,而样品接头较重,在焊接接头时难免会弯曲样品,此过程易损坏样品本身.所以每次制作会有部分样品损坏,但每次制作能够用于测试的样品分别为 7 条、8 条、12 条、13 条,

成品率高于 80%.

3 测试结果及分析

3.1 微桥器件表面形貌表征

利用扫描电子显微镜 (SEM) 对 YBCO 薄膜的微桥器件进行形貌表征,如图 5(a) 所示,右上角插图微桥的版图示意图.图 5(b) 展示了制备完成后的微桥宽度为 10.52 μm ,图 5(c), (d) 为高分辨率下微桥上的 YBCO 表面,图中存在的空隙通常在金属有机沉积法 (MOD) 生产的 YBCO 层中发现,也有可能是由于腐蚀过程引起的.但与通过电磁加热剥离的 YBCO 表面有着相似的表面形貌,所以通过上述方法制作的器件不会造成较大的表面形貌变化.

3.2 腐蚀对 YBCO 薄膜超导转变宽度与上临界场影响

漏热样品制作过程中,需要对剥离的 YBCO 薄膜进行腐蚀,去掉漏热较大的铜层与部分银层,因此对腐蚀各个阶段的 YBCO 薄膜样品的超导转变宽度与上临界磁场进行了对比.如图 6 所示, YBCO-2G-Wire 代表 YBCO 带材, YBCO-Ag-Cu 代表剥离下来带有铜层和银层的 YBCO 薄膜, YBCO-Ag 代表带有银层的 YBCO 薄膜并已经转移到 PI 上, YBCO 代表腐蚀掉银层的 YBCO

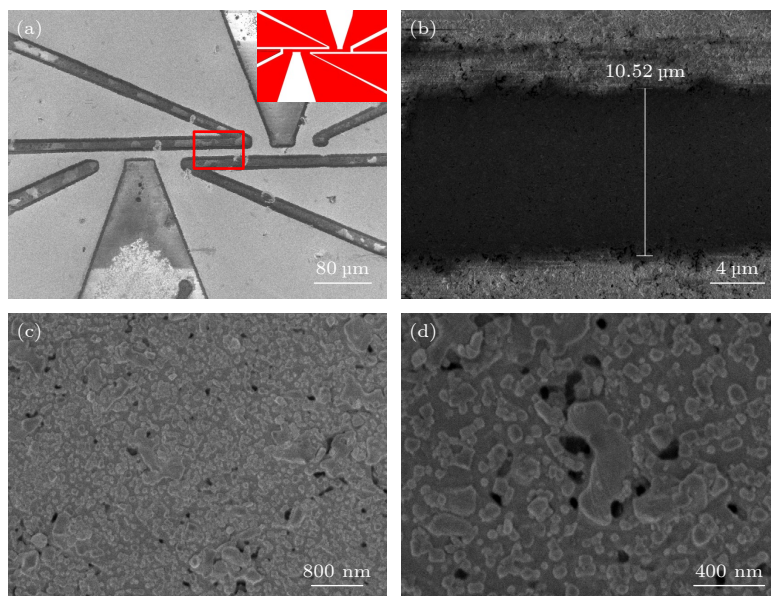


图 5 (a) YBCO 微桥器件 SEM 图片; (b) 微桥宽度; (c), (d) 高分辨率 YBCO 表面

Fig. 5. (a) SEM image of YBCO microbridge device; (b) microbridge width; (c), (d) high resolution YBCO surface.

薄膜并已经转移到 PI 上. 图 6(a)–(d) 为采用标准四线法利用 PPMS 测量电阻随温度的变化曲线, 图中均表现出明显的电阻转变. 正常态电阻减小 90% 和 10% 对应的温度分别设置为 T_c^{Zero} 和 T_c^{Onset} , 两者的差值即为转变宽度 ΔT_c . 在 0 T 情况下、其中图 6(a), (b) 中 T_c^{Zero} 分别为 90.81, 90.82 K; T_c^{Onset} 分别为 91.3, 91.34 K; 即 ΔT_c 分别为 0.49, 0.52 K. 表明了机械冷剥离的 YBCO 薄膜与带材有着相近的转变宽度, 证明剥离的 YBCO 薄膜质量与带材

几乎相同. 而图 6(c), 6(d) 在 0 T 情况下的 T_c^{Zero} 分别为 91.19, 91.03 K; T_c^{Onset} 分别为 91.98, 91.82 K; 即 ΔT_c 均为 0.79 K, 略大于带材和剥离的 YBCO 薄膜, 表明在腐蚀铜的过程中会对 YBCO 薄膜质量产生一定影响, 而在腐蚀银的过程中, 因为腐蚀时间较短对 YBCO 薄膜质量不会造成明显影响 [21]; 虽然腐蚀会对 YBCO 薄膜质量产生一定影响, 但腐蚀后 $\Delta T_c = 0.79$ K, 表明该薄膜的质量较高. 从上述分析看出, $T_{c(2G \text{ Wire})} \approx T_{c(\text{YBCO-Ag-Cu})} <$

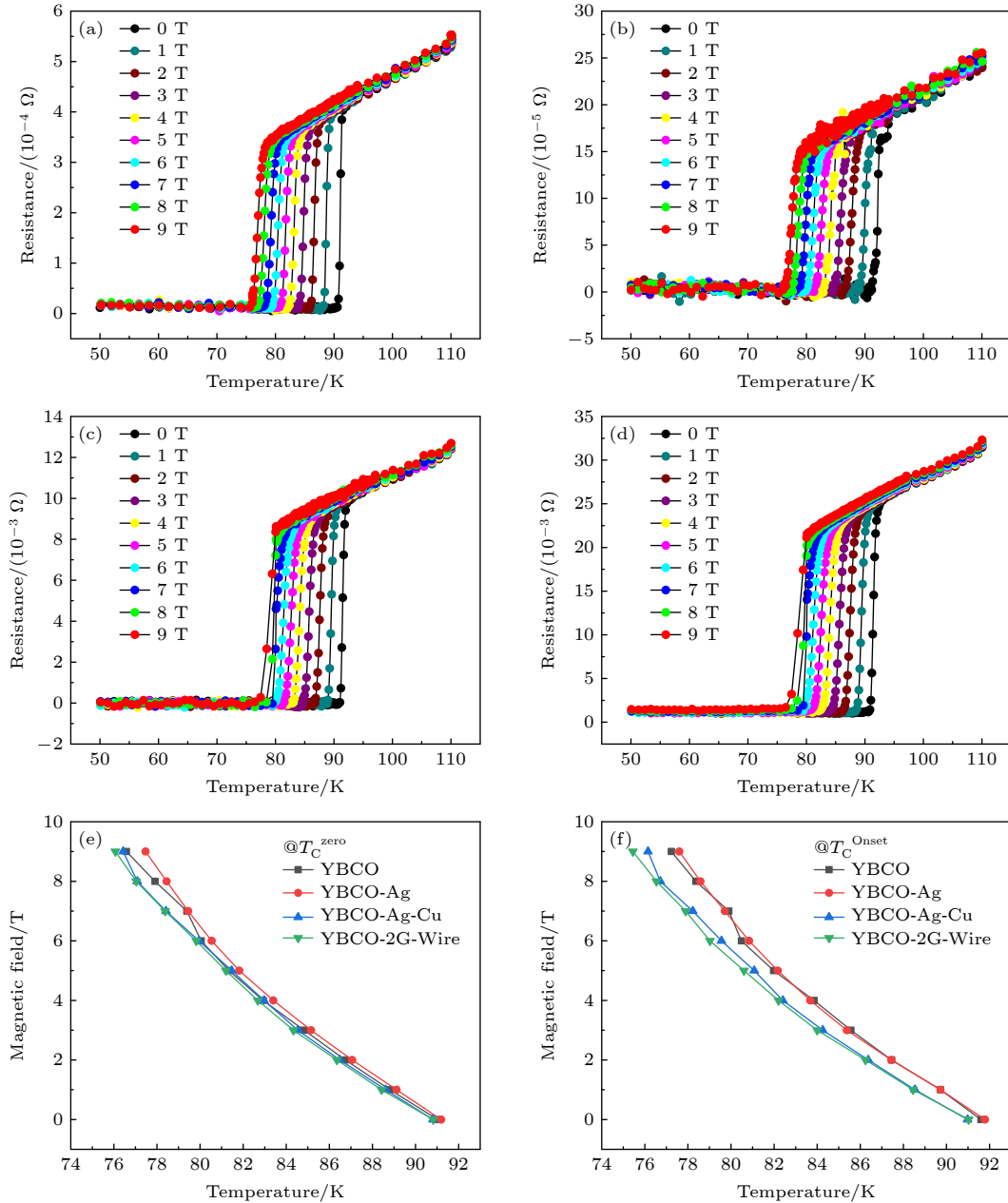


图 6 (a) 2G 带材 R - T 曲线; (b) 带铜、银的 YBCO 薄膜 R - T 曲线; (c) 带银的 YBCO 薄膜 R - T 曲线; (d) YBCO 薄膜 R - T 曲线; (e), (f) T_c^{Zero} , T_c^{Onset} 随磁场变化曲线

Fig. 6. (a) 2G strip R - T curve; (b) R - T curve of YBCO thin film with copper and silver; (c) R - T curve of YBCO thin film with silver; (d) YBCO thin film R - T curve; (e), (f) T_c^{Zero} , T_c^{Onset} versus magnetic field variation curve.

$T_c(\text{YBCO-Ag}) \approx T_c(\text{YBCO})$ 的实验结果与 Brookhaven 公司的实验结果一致, 转移到 PI 上的薄膜具有更高的超导转变温度, 这是因为降温时 YBCO 层的面内压缩. YBCO 薄膜生长在热膨胀系数密切匹配的镍基基底上, 从室温降温到 77 K 时, YBCO 层收缩率为 -0.21% , 与镍基基底的 -0.22% 非常接近, 将 YBCO 薄膜附着在较厚的 PI 上, 将经历 -0.25% 的面内压缩^[14]. Pahlke 等^[22] 估计, 每施加 -1% 的压缩应变, 面内压缩将使 T_c 提高 0.75 K. 观察到 $T_c(\text{YBCO-Ag})$ 和 $T_c(\text{YBCO})$ 相对于 $T_c(\text{YBCO-Ag-Cu})$ 分别增大 0.37 K 和 0.22 K, 这表明平面内压缩水平大于 -0.25% , 是由于 PI 表面的粘合剂可能会增加额外的压缩.

图 6(e), (f) 展示了不同磁场下的 T_c^{Zero} 和 T_c^{Onset} 的曲线, 从图中可以看出带银的 YBCO 样品具有最大的转变温度 T_c 、其次为 YBCO 薄膜样品; 而剥离的带铜层、银层的 YBCO 薄膜和带材有最小且几乎相同的超导转变温度. 此外为推导出零温度下的上临界磁场强度 H_{c2} (平行于 c 轴方向), 利用 Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) 公式 $H_{c2}(0) = -0.693T_c(dH_{c2}/dT)$ ^[23], 计算出 YBCO-2G-Wire, YBCO-Ag-Cu, YBCO-Ag, YBCO 四个阶段上临界场分别为 38.4, 39.3, 41.3, 39.1 T. Nakao 等^[24] 报道了单晶 YBCO 平行于 c 轴方向的上临界场为 (40 ± 5) T, 与本文的计算值一致. 表明剥离、腐蚀等步骤对 YBCO 薄膜的上临界场几乎没有影响.

3.3 YBCO 薄膜临界电流密度表征

为研究剥离工艺对 YBCO 薄膜超导传输特性的影响, 对剥离的 YBCO 薄膜进行了临界电流的表征. 该 YBCO 薄膜厚度为 $1 \mu\text{m}$, 具有较大的临界电流, 所以利用剥离的 YBCO 薄膜进行了微桥器件的制作, 并在不同温度 and 不同磁场下进行 $I-V$ 测试; 图 7 展示了不同微桥器件 77 K 不同磁场下的 $I-V$ 曲线; 从图中可以看出, 磁场越大, $I-V$ 曲线非线性区域越宽, 相反在低场或者无场下的 $I-V$ 曲线非线性区域就越窄, 这是因为当磁场低于一定值时, 在超导体的边界处穿透深度内会出现一个屏蔽电流来对抗外磁场的侵入, 样品处于迈斯纳态. 然而, 当磁场超过一定值的时候, 磁场会进入到超导体内, 迈斯纳态被破坏掉, 在超导体内形成超导区和正常区及其相应的界面. 图 7(a), (b) 分别展示

了两个器件的 $I-V$ 曲线, 不同的微桥器件在相同温度和磁场的测量情况下有着接近的临界电流. 本文临界电流的选取方法为电压从超导态时的电压 (接近零) 上升 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 所对应的电流值. 根据 $I-V$ 曲线和微桥尺寸可以得到两个器件在不同温度 and 不同磁场下的临界电流密度.

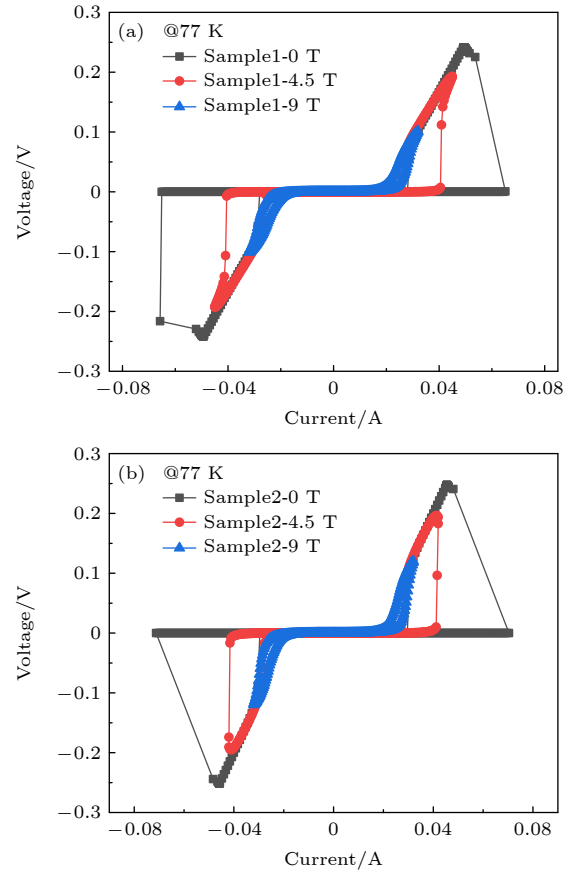


图 7 (a), (b) 不同 YBCO 薄膜微桥器件的 $I-V$ 测试曲线
Fig. 7. (a), (b) $I-V$ test curves of different YBCO thin film micro-bridge devices.

根据带材方提供的数据, 该带材在 77 K, 0 T 时具有 125 A 的临界电流, 即具有 $1.04 \times 10^6 \text{ A}/\text{cm}^2$ 数量级的临界电流密度. 图 8 所展示的 YBCO 薄膜在 77 K, 0 T 时的临界电流密度为 $7.7 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$, 证明了腐蚀和工艺加工后的 YBCO 薄膜仍然具有带材 75% 以上的临界电流密度. 典型的超导传输线线宽为百微米量级, 即使用该剥离的 YBCO 薄膜制作的传输线能够承受大于 1.5 A 的工作电流, 是满足使用需求的, 所以采取该工艺制作后的 YBCO 薄膜具有良好的超导传输特性. 且两个微桥器件具有几乎相同的临界电流密度, 证明加工工艺不会对剥离的 YBCO 薄膜传输性能有显著的影响.

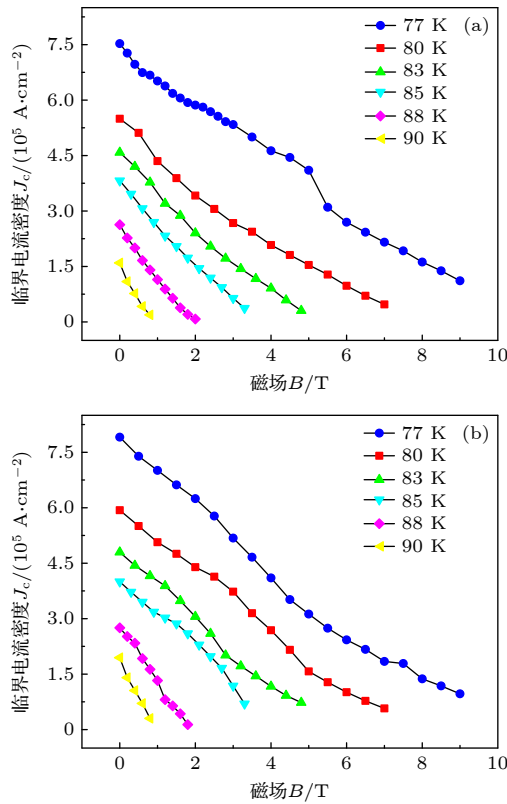


图 8 YBCO 薄膜临界电流密度随磁场变化曲线 (a) 样品 1; (b) 样品 2

Fig. 8. Curve of critical current density of YBCO thin film as a function of magnetic field: (a) Sample 1; (b) sample 2.

3.4 漏热值测量

对 PI-YBCO-PI 结构的超导传输线进行漏热值测量, 该传输线样品尺寸为长 12 cm、宽 1 cm, 由于该样品没有进行图形制作, 所以测得的漏热值为 1 cm 宽的传输线整体漏热值. 利用 G-M 制冷机进行漏热测试, 共进行两次测试, 即空载 (无样品) 和搭载传输线样品两种情况下进行测量, 并通过温控仪 (Lakeshore Model 336) 控制一级和二级冷台的温度, 使得一级冷台和二级冷台分别稳定在 40 K 和 4.2 K, 通过计算空载和搭载传输线样品时制冷机冷量, 两个实验的冷量差即为 40—4.2 K 传输线带来的漏热数值. 测试结果表明,

长 12 cm, 宽 1 cm 的传输线样品的漏热值为 0.238 mW. 通过仿真, 在特征阻抗设计为 50 Ω 和相邻两个通道间的串扰小于 -40 dB 的情况下, 1 cm 宽的传输线样品共可以制作 5 条信号通道, 且每条 12 cm 长的信号通道在 9 GHz 处的插损小于 -2 dB, 其中最外侧的信号线串扰相较于其他通道稍差, 是因为两侧存在边缘效应, 导致仿真结果存在差异, 具体仿真结果如图 9 所示. 即 5 个信号通道的漏热值为 0.238 mW, 每 1 个通道所引起的漏热值平均为 47.6 μ W.

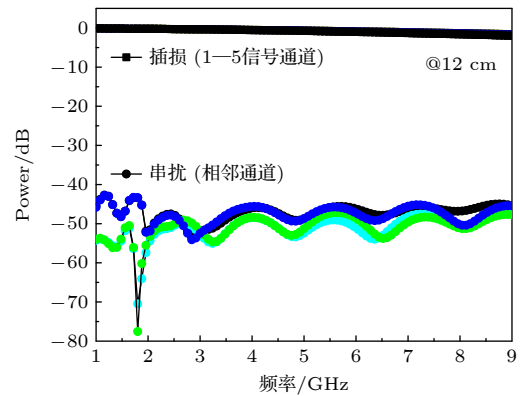


图 9 信号通道插损和相邻通道间的串扰

Fig. 9. Signal channel insertion loss and crosstalk between adjacent channels.

表 1 展示了不同类型传输线的漏热对比 (12 cm, 40—4.2 K), 金属传输线为不同机构制作的铍铜线, 超导传输线为 Brookhaven 公司展示的 YBCO-Kapton 与本文所制备的 PI-YBCO-PI 基于 YBCO 薄膜的柔性传输线. 金属传输线的漏热为每一根同轴线的漏热值, 其数据来源于文献 [11]; 利用 Brookhaven 公司所测 2 mm 宽、25 cm 长的 YBCO-Kapton 传输线在 50—4 K 温区的漏热值为 78 μ W [16], 该传输线热导率为 $\kappa \approx 212$ W/(m·K), 则 40—4.2 K, 线宽 2 mm, 长 12 cm 的传输线漏热值为 127 μ W. 本文所测得每条 2 mm 宽的信号通道漏热值为 47.6 μ W

表 1 不同机构低温传输线漏热值对比 (12 cm, 40—4.2 K)

Table 1. Leakage heat value of low-temperature transmission lines in different institutions (12 cm, 40—4.2 K).

传输线类型	金属传输线		超导传输线(YBCO)	
	机构A同轴线	机构B同轴线	PI-YBCO-PI	YBCO-Kapton
漏热/ μ W	1100	255	47.6	127
插损@1 GHz-dB/m	4	5	0.83	—
插损@6 GHz-dB/m	—	—	7.2	2

对比表 1 可以看出, 40—4.2 K 温区的金属传输线漏热值均大于 200 μW , 为本文测试的基于 YBCO 的超导传输线漏热值的 5 倍以上, 且超导传输线在相同长度和频率下会具有更小的插损. 根据 Mike Sutherland 所测的 YBCO 热导率随温度的变化曲线, 选取 40—4.2 K 温区热导率的最大值 $\kappa \approx 41 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[25], 则长 12 cm、线宽 2 mm 的传输线的理论漏热值为 24.6 μW , 而 YBCO-Kapton 漏热值为 127 μW , 相较于理论值, 该传输线的漏热值较大, 原因可能是由于其测试线的结构造成的; 本文则是为了保证传输线具有更好的机械强度, 保留了 YBCO 薄膜表面部分银和 PI-YBCO-PI 结构造成的漏热值偏大. 虽然在相同线宽和长度的情况下本文所制备的传输线具有更小的漏热值, 但由于 Brookhaven 公司制备的基于 YBCO 的超导传输线具有优异结构的原因, 其插损则会更小.

4 结 论

实验结果表明, 通过机械冷剥离的 YBCO 薄膜 ΔT_c 为 0.52 K, 与带材的 $\Delta T_c = 0.49 \text{ K}$ 几乎相同, 经过腐蚀后的 YBCO 薄膜超导转变宽度由 0.52 K 变大到 0.79 K, 但实验测试数据表明机械冷剥离的 YBCO 薄膜经工艺加工后仍然具有与带材 75% 以上的临界电流密度 ($7.7 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$). 且 SEM 证明了通过光刻和腐蚀后的 YBCO 薄膜微桥器件与 Brookhaven 通过电磁加热剥离的 YBCO 表面有相似的表面形貌, 所以通过该工艺步骤后的 YBCO 薄膜仍然具有与带材相似的超导传输性能, 满足传输线的制作要求. 长 12 cm, 宽 1 cm 的 PI-YBCO-PI 结构的超导柔性线 40—4.2 K 的漏热值为 0.238 mW. 在特征阻抗为 50 Ω 和相邻通道串扰小于 -40 dB, 9 GHz 处的插损小于 -2 dB 的情况下, 1 cm 宽的样品上可以制作 5 条信号通道, 即每条信号通道 (2 mm 宽的 PI-YBCO-PI 结构的超导柔性线) 的漏热值为 47.6 μW , 远小于金属传输线的漏热. 本文冷剥离的 YBCO 薄膜具有与带材相似的超导传输性能, 因此常温下冷剥离的 YBCO 薄膜可用于射频传输线的制备.

参考文献

- [1] Holmes D S, Ripple A L, Manheimer M A 2013 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** 1701610
- [2] Yuan P S, Yu H Q, Wang S N, Wang Y L, Li L Y, You L X 2020 *Low. Temp. Phys. Lett.* **42** 117 (in Chinese) [原蒲升, 余慧勤, 汪书娜, 王永良, 李凌云, 尤立星 2020 低温物理学报 **42** 117]
- [3] Zhang T Z, Huang J, Zhang X Y, Ding C M, Yu H Q, You X, Lv C L, Liu X Y, Wang Z, You L X, Xie X M, Li H 2024 *Photonics Res.* **12** 1328
- [4] Coady S 2022 US Patent 0 237 491
- [5] Gupta D, Sarwana S, Kirichenko D, Dotsenko V, Lehmann A E, Filippov T V, Chang S W, Ravindran P, Bardin J 2021 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 130328
- [6] Duan S Y, Wu J B, Fan K B, Zhang G H, Jin B B, Chen J, Wu P H 2022 *J. Funct. Mater. Devices* **28** 7 (in Chinese) [段思宇, 吴敬波, 范克彬, 张彩虹, 金颢兵, 陈健, 吴培亨 2022 功能材料与器件学报 **28** 7]
- [7] Smith J P, Mazin B A, Walter A B, Daal M, Bailey I I, Bockstiegel C, Zobrist N, Swimmer N, Steiger S, Fruitwala N 2021 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31** 2500105
- [8] Kurpiers P, Magnard P, Walter T, Royer B, Pechal M, Heinsoo J, Salathé Y, Akin A, Storz S, Besse J C, Gasparinetti S, Blais A, Wallraff A 2018 *Nature* **558** 264
- [9] Li L M, He L, Wu X, Niu X K, Wan C, Lin K, Jia X Q, Zhang L B, Zhao Q Y, Tu X C 2021 *FITEE* **22** 1666
- [10] Krinner S, Storz S, Kurpiers P, Magnard P, Heinsoo J, Keller R, Luetolf J, Eichler C, Wallraff A 2019 *EPJ Quantum Technol.* **6** 2
- [11] Wang S N, Yu H Q, Yuan P S, Wang Y L, Li L Y, You L X 2020 *Cryo. Supercond.* **50** 85 (in Chinese) [汪书娜, 余慧勤, 原蒲升, 王永良, 李凌云, 尤立星 2020 低温与超导 **50** 85]
- [12] Yu X, Zhang Y H, Bin F, Lu Q L, Wang S W 2022 *J. Funct. Mater. Devices* **1** 6 (in Chinese) [禹潇, 张亚辉, 宾峰, 陆勤龙, 王生旺 2022 功能材料与器件学报 **1** 6]
- [13] Solovyov V, Farrell P 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 014006
- [14] Solovyov V, Rabbani S, Ma M, Mendleson Z, Haugan T, Farrell P 2019 *Supercond. Sci. Technol.* **32** 054006
- [15] Solovyov V, Saria O P, Mendleson Z, Drozdow I 2021 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31** 1700105
- [16] Solovyov V, Kim H, Farrell P 2024 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **34** 1500205
- [17] Bruel M 1996 *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **108** 313
- [18] Toyoda M, Hou S, Huang Z H, Lmagaki M 2023 *Carbon Lett.* **33** 335
- [19] Saliba M, Atanas J P, Howayek T M, Habchi R 2023 *Nanoscale Adv.* **5** 6787
- [20] Solovyov V F, Develos-Bagarinao K, Li Q, Qing J, Zhou J 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 014008
- [21] Wang M J 2020 *Ph. D. Dissertation* (Chendu: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [王明江 2020 博士学位论文 (成都: 西南交通大学)]
- [22] Pahlke P, Trommler S, Holzapfel B, Schultz L, Hühne R 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 123907
- [23] Toyota N, Inoue A, Fukase T, Masumoto T 1984 *J. Low Temp. Phys.* **55** 393
- [24] Nakao K, Miura N, Tatsuhara K, Takeya H, Takei H 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 97
- [25] Sutherland M L, Hawthorn D G, Hill R W, Ronning F, Wakimoto S, Zhang H, Proust C, Boaknin E, Lupien C, Taillefer L, Liang R, Bonn D A, Hardy W N, Gagnon R, Hussey N E, Kimura T, Nohara M, Takagi H 2003 *Phys. Rev. B* **67** 174520

Process development and characteristics of YBCO thin film for radio frequency transmission wire preparation^{*}

TIAN Qingwen¹⁾²⁾ YUAN Pusheng^{2)†} YU Huiqin²⁾ WANG Shuna²⁾
LIU Xiaoyu²⁾ LI Lingyun²⁾ YOU Lixing^{2)‡}

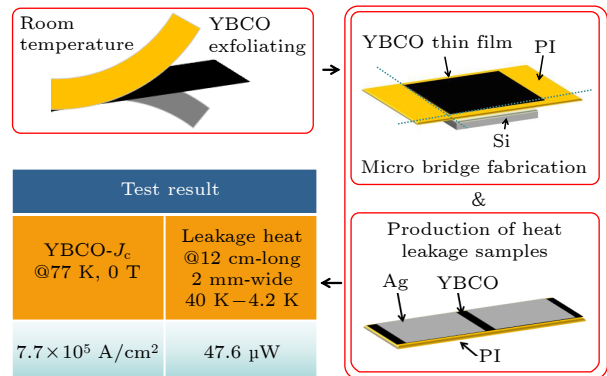
¹⁾ (School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

²⁾ (Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(Received 12 November 2024; revised manuscript received 11 December 2024)

Abstract

Low-temperature interconnection technology, especially radio frequency signal transmission in the 40–4.2 K temperature range, is currently a focus of development. In this temperature range, the transmission line needs to have as little insertion loss and heat leakage as possible. A processing method of preparing coplanar waveguide flexible transmission lines by mechanically cold exfoliating superconducting tape thin films is introduced in this work. Especially YBCO thin films deposited through MOD are more easily exfoliate directly at room temperature. The superconducting transition temperature width of YBCO thin film after exfoliating processing is 0.79 K. Although it is increased by 0.3 K compared with the transition temperature width of the strip, the critical current density at 77 K and 0 T is 7.7×10^5 A/cm², which is more than 75% of the critical current density of the strip. The exfoliated YBCO thin film is fabricated into a 12-cm-long and 1-cm-wide PI-YBCO-PI three-layer structure transmission line, and the heat leak value is measured to be 0.238 mW in a temperature range from 40 K to 4.2 K. Five signal channels are prepared on a 1cmwide YBCO thin film, and the simulation shows that the crosstalk between adjacent signal channels is < -40 dB, the insertion loss at 9 GHz is < -2 dB, and the heat leak value of each signal channel is 47.6 μ W. Compared with the metal transmission lines currently used in this temperature range, the heat leakage is reduced by at least 5 times.



Keywords: YBCO thin film, flexible transmission line, interconnection across temperature zones

PACS: 74.25.F-, 74.25.-q, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.74.20241583

CSTR: 32037.14.aps.74.20241583

^{*} Project supported by the Shanghai “Phosphor” Science Foundation, China (Grant No. 22YF1456500) and the Chinese Academy of Sciences Technical Support Talent Program (2022).

[†] Corresponding author. E-mail: psyuan@mail.sim.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: lxyou@mail.sim.ac.cn



用于射频传输线制备的YBCO薄膜工艺开发与特性研究

田清文 原蒲升 余慧勤 汪书娜 刘晓宇 李凌云 尤立星

Process development and characteristics of YBCO thin film for radio frequency transmission wire preparation

TIAN Qingwen YUAN Pusheng YU Huiqin WANG Shuna LIU Xiaoyu LI Lingyun YOU Lixing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 057401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241583

CSTR: 32037.14.aps.74.20241583

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241583>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

15 MA Z箍缩装置真空磁绝缘传输线损失电流的电路模拟

Circuit simulation of current loss in magnetically insulated transmission line system in 15- MA Z-pinch driver

物理学报. 2022, 71(10): 105202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212378>

GeTe薄膜电性能优化及射频应用

Optimization of electrical properties and radio frequency applications of GeTe thin film

物理学报. 2024, 73(19): 190702 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241019>

太赫兹金属线波导传输特性实验研究及模拟分析

Experimental study and simulation analysis of transmission characteristics of terahertz metal wire waveguides

物理学报. 2024, 73(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240279>

15 MA Z箍缩装置真空磁绝缘传输线鞘层电子流分析

Analysis of electron flow current in vacuum magnetically-insulated-transmission-line sheath for 15-MA Z-pinch driver

物理学报. 2023, 72(3): 035204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221901>

前进接触线薄液膜结构与运移机制

Structure and migration mechanism of thin liquid film in vicinity of advancing contact line

物理学报. 2024, 73(1): 016801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231296>

一维超导传输线腔晶格中的拓扑相变和拓扑量子态的调制

Modulation of topological phase transitions and topological quantum states in one-dimensional superconducting transmission line cavities lattice

物理学报. 2022, 71(19): 194203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220675>