



太赫兹波段高温超导体传输特性表征系统

赵思源^{1,2}, 胡洁^{1*}, 支强^{1,2}, 丁江乔¹, 周康敏¹, 刘冬¹, 缪巍¹, 袁洁³, 田士兵³, 李婧¹, 史生才¹

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

2. 中国科学技术大学天文与空间科学学院, 合肥 230026

3. 中国科学院物理研究所, 北京 100190

* 联系人, E-mail: jiehu@pmo.ac.cn

2025-08-14 收稿, 2025-12-29 修回, 2025-12-29 接受, 2025-12-30 网络版发表

中国科学院超导项目(SCZX-0203)资助

摘要 在天文研究中, 太赫兹波段覆盖大量关键原子与分子谱线, 是研究星际介质与星系演化的重要窗口. 当前主流太赫兹天文超导探测器多采用低温超导材料(如铝、铌及氮化铌等), 其工作温度限制了器件规模化与实用性. 相比之下, 高温超导体, 尤其是铜基高温超导材料钇钡铜氧(YBCO), 凭借其较高的超导临界温度和优秀的电学性能, 正逐渐成为太赫兹探测技术的新候选. 本研究旨在评估高温超导材料在太赫兹波段的可能性, 构建了一套基于波导耦合的太赫兹谐振器表征系统, 用于测量其在75~110 GHz频段的导电损耗特性. 通过该系统, 初步测得了YBCO谐振器的谐振响应及其品质因子(Q 值), 验证了测量系统的可行性, 为推动高温超导材料在太赫兹波段的应用提供了重要的表征手段.

关键词 高温超导体, 钇钡铜氧, 谐振器, 太赫兹

太赫兹(terahertz, THz)波通常指频率范围在0.1~10 THz之间的电磁波, 位于微波与红外波段之间. 它具备一定的穿透能力, 对极性分子和晶格振动表现出高度敏感性^[1], 因此在天文观测、成像技术、生物医学、无损检测和高速通信等领域展现出广阔的应用前景^[2~7]. 在天文学中, 太赫兹波段覆盖了大量关键原子和分子谱线, 是研究星际介质、恒星形成以及星系演化的重要窗口^[8].

超导探测器(如超导动态电感探测器(kinetic inductance detector, KID)和超导隧道结探测器(superconductor-insulator-superconductor, SIS)等^[9~11])因其高灵敏度、低噪声和宽频带响应等特点, 已成为太赫兹波段天文研究中不可或缺的核心器件^[5]. 这些探测器目前普遍采用铝、铌以及氮化铌等传统低温超导材料, 其超导临界温度(T_c)较低, 需要在极低温下工作(通常为4 K

以下). 这对制冷系统提出了苛刻要求, 必须依赖体积庞大、结构复杂、能耗极高的低温制冷系统. 由此不仅显著增加了系统的体积和功耗, 也提高了运行与维护成本, 进而对超导探测器在极端环境中的部署和应用造成了严重限制.

近年来, 高温超导体(high-temperature superconductors, HTS), 尤其是钇钡铜氧(YBCO)^[12]和铽钡铜氧(TIBCO)^[13]等铜基材料, 在太赫兹波段的应用潜力受到越来越多的关注. 此类铜基高温超导体的超导临界温度普遍高于液氮温区(77 K), 如YBCO的 T_c 通常大于90 K. 若能将高温超导体引入超导探测器领域, 其工作温度可以显著提高, 从而大幅减小制冷系统的体积和功耗. 这将为其在极端环境(如南极冰穹A)的应用提供新的可能性.

为探索高温超导材料在太赫兹波段的可行性, 我

引用格式: 赵思源, 胡洁, 支强, 等. 太赫兹波段高温超导体传输特性表征系统. 科学通报, 2026, 71: 2450–2456

Zhao S, Hu J, Zhi Q, et al. Characterization system for terahertz-band transmission properties of high-temperature superconductors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2450–2456, doi: [10.1360/CSB-2025-5366](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5366)

们构建了一个基于波导耦合谐振器的太赫兹表征系统, 重点研究高温超导材料在75~110 GHz频段内的导电损耗特性, 为其未来在更高频段的应用提供基础. 本文将介绍基于高温超导材料的太赫兹谐振器设计、表征系统, 以及基于YBCO薄膜谐振器的初步实验测试结果.

1 太赫兹W波段谐振器设计

为了准确测量高温超导薄膜在太赫兹波段的损耗, 设计了如图1(a)所示的W波段谐振器. 该谐振器采用微带线结构, 主要原因是微带线结构更易于实现与波导探针的宽带耦合. 其工作原理如下^[14]: 当谐振器长度为传输信号半波长的整数倍时, 会在对应的频率处产生显著的谐振峰. 在此基础上, 通过对传输谱(S_{21})谐振峰的拟合得到有载品质因子(Q_L), 经耦合校准后, 可提取出表征谐振器自身能量损耗的无载品质因子 Q_0 (总损耗为 $1/Q_0$), 其可进一步分解为导体损耗、介质损耗及

辐射损耗贡献之和. 由于本设计所采用的MgO衬底介质损耗极低, 且通过结构优化(衬底厚度)有效抑制了辐射损耗, 因此最终得到的品质因子 Q_C 直接对应于高温超导薄膜的导体损耗. 谐振器所用的衬底为MgO, 设计厚度为200 μm . 谐振器长度为3.72 mm, 两端通过缝隙电容耦合到电路中, 缝隙宽度为100 μm . 波导到微带线采用探针结构. 太赫兹谐振器的第一个谐振频率为17.7 GHz, 在75~110 GHz范围内共存在3个谐振峰, 如图1(b)所示. 波导腔体及传输线的导体仿真所用材料均为金.

2 太赫兹高温超导谐振器传输特性测量系统设计与构建

为了测试太赫兹高温超导谐振器在太赫兹波段的传输损耗, 我们构建了如图2所示的基于波导结构太赫兹高温超导谐振器传输特性测量系统(以下简称“谐

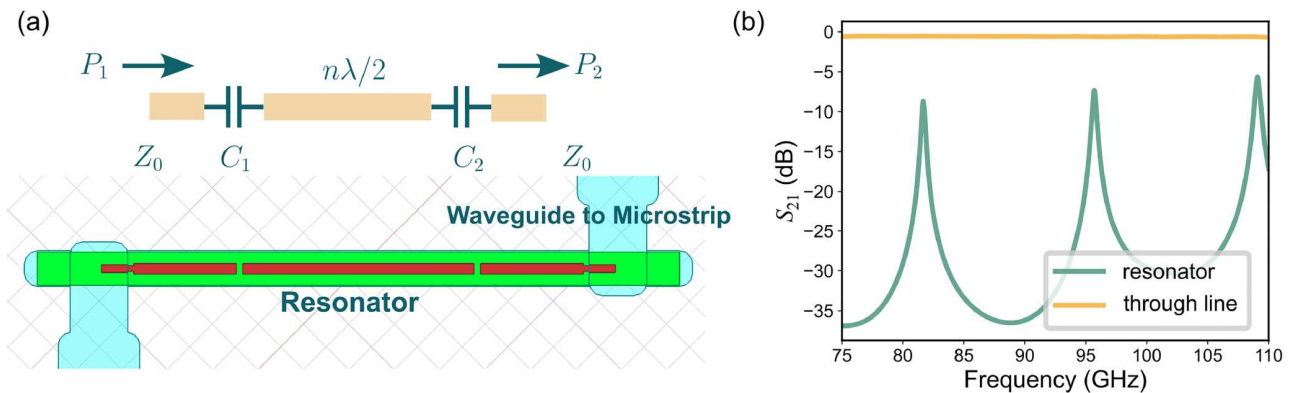


图1 (网络版彩色)(a) 太赫兹W波段谐振器原理图设计. (b) 太赫兹谐振器及直通线的仿真结果

Figure 1 (Color online) (a) Schematic design of the THz W-band resonator. (b) Simulation results of the THz resonator and through line

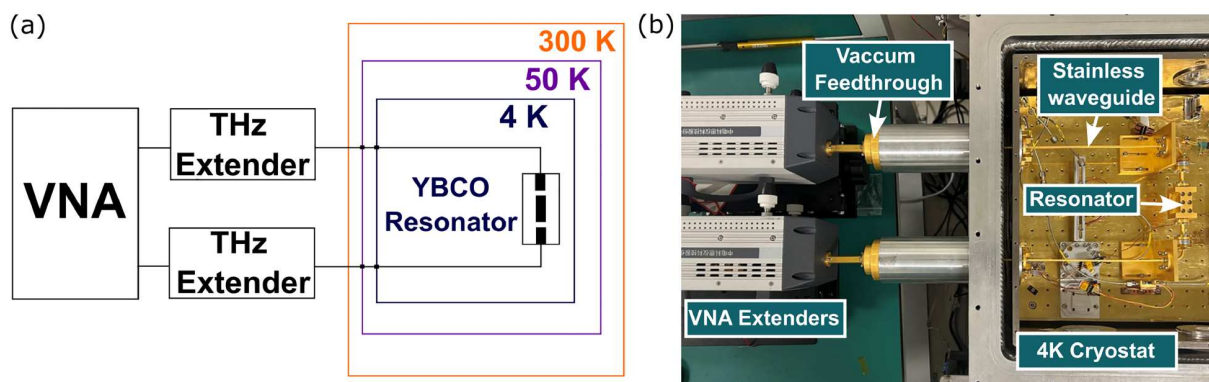


图2 (网络版彩色)太赫兹高温超导谐振器测试系统框图(a)及实物图(b)

Figure 2 (Color online) THz high-temperature superconducting resonator test setup. (a) Block diagram; (b) physical photograph

振测量系统”)。该谐振测量系统的工作温度范围为4.5~120 K, 工作频率范围为W波段75~110 GHz。测试系统由太赫兹矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)、4 K制冷机系统及波导传输链路组成。太赫兹VNA系统基于罗德与施瓦茨(Rohde & Schwarz)矢量网络分析仪ZNA50, 并配备两个W波段频率扩展模块, 输出端口类型为WR10波导, 系统的动态范围约为90 dB。4 K制冷机系统采用GM闭循环低温制冷机, 其4 K冷板上安装有一组加热电阻, 并由温度控制器(Lakeshore 335)通过PID闭环方式进行温度调控。被测太赫兹谐振器通过镀金不锈钢波导与外部传输链路连接。

实现谐振测量系统的关键主要有: 低振动制冷机系统设计、低损耗的波导传输链路, 以及太赫兹波段波导真空密封法兰。

太赫兹波段波长短, 制冷机的振动对测试系统的稳定性有极大的影响。本实验所使用的4 K制冷机配备三个冷极, 分别对应温度等级为300、50和4 K。为了降低制冷机的振动, 制冷机的冷头与50 K冷极及4 K冷极间采用软铜带连接。实测制冷机振动小于1 μm 。

谐振测量系统设计的另一个关键是低损耗的波导传输链路。太赫兹高温超导谐振器安装在4 K冷极上, 通过金属波导与室温端的太赫兹矢量网络分析仪连接, 实现信号的输入与输出。但是这两段波导同时连接着300和4 K, 会带来显著的漏热。因此, 波导长度和材料的选择需要在漏热与传输损耗间平衡。为有效抑制漏热, 不同温区间的连接波导材料为0.5 mm厚的不锈钢。这些波导内表面及外表面均镀有1 μm 的金, 以降低传输损耗。同时, 不锈钢波导通过无氧铜固定到50 K冷级

处, 以进一步减小由300 K到4 K的漏热。波导的漏热 $\dot{Q}_{\text{HC}}$ 由式(1)计算得到:

$$\dot{Q}_{\text{HC}} \frac{L}{A} = - \int_{T_{\text{H}}}^{T_{\text{C}}} k(T) dT, \quad (1)$$

其中, L 为波导的长度, A 为波导的截面积, $k(T)$ 为波导材料在不同温度下的热导率。不锈钢波导的长度选为160 mm, 可以计算得到300 K到50 K的漏热功率约为170 mW, 50 K到4 K的漏热功率约为7.8 mW, 其插入损耗(S_{21})约为4 dB, 反射系数(S_{11})小于-25 dB, 满足实验要求, 如图3(a)所示。

谐振测量系统的最后一个设计关键是太赫兹波段波导真空密封法兰。为了维持制冷机内部的高真空环境, 在波导进入制冷机处设计了专用的真空密封穿墙法兰。该法兰结构中, 在两个波导之间插入了一层约20 μm 厚的Mylar薄膜, 用以实现真空密封并兼顾太赫兹信号的传输。真空密封穿墙法兰的插入损耗和反射系数如图3(b)所示。从测试结果可见, 真空密封法兰的插入损耗平坦, 在整个频段内小于0.5 dB。

将谐振测量系统接入一根直通波导后, 可以得到系统整体的传输损耗, 如图4(a)所示。测量结果表明, 在75~80 GHz频段内系统整体损耗较高, 最高可达约20 dB; 而在90~105 GHz范围内, 系统损耗相对较小, 维持在12 dB左右。低频段损耗较大的主要原因是波导在接近截止频率附近插入损耗显著增加。考虑到系统中输入与输出共包含有4根镀金不锈钢波导, 该结果与图3(a)中的波导损耗基本保持一致。另外, S_{21} 中并未

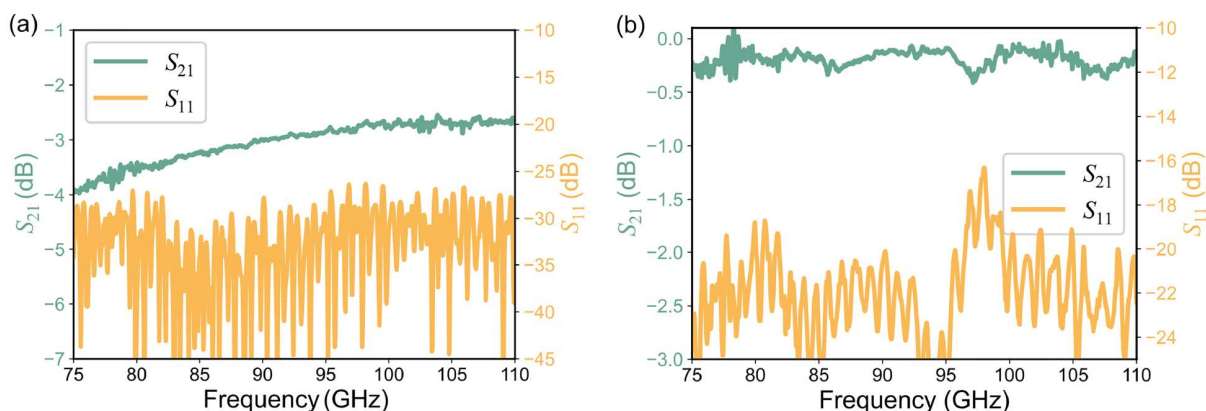


图3 (网络版彩色)(a) 160 mm镀金不锈钢波导的插入损耗及反射系数; (b) 波导密封法兰的插入损耗及反射系数

Figure 3 (Color online) (a) Insertion loss and reflection coefficient of the 160-mm gold-plated stainless steel waveguide. (b) Insertion loss and reflection coefficient of the waveguide sealing flange

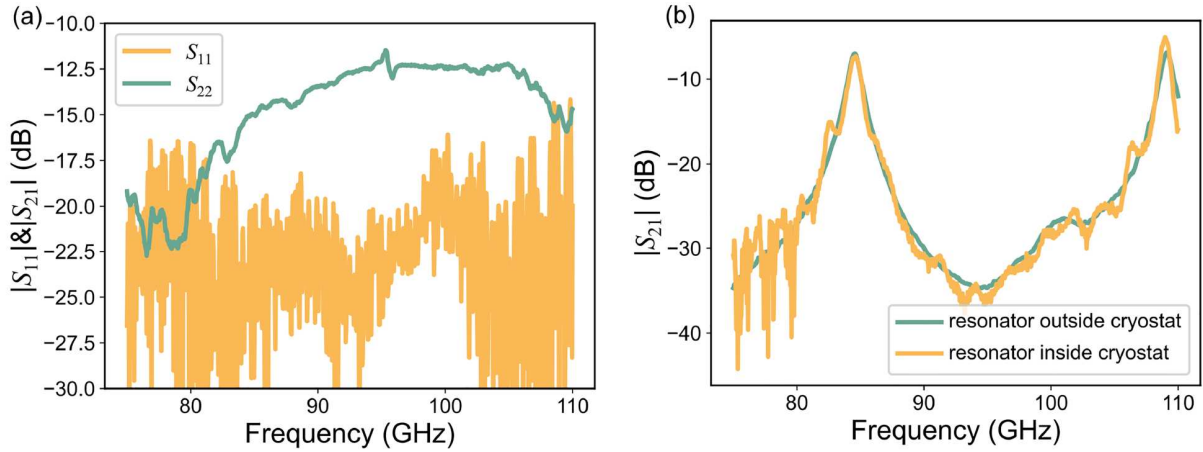


图4 (网络版彩色)(a) 测试系统在接入直通波导后的插入损耗; (b) 常温下金谐振器在系统中测试与系统外测试比较

Figure 4 (Color online) (a) Insertion loss of the test system with through waveguide connection. (b) Comparison of a gold resonator inside and outside of the measurement system

看到明显的纹波, 表明谐振测量系统阻抗匹配良好. 图4(b)中比较了常温下金谐振器在谐振测试系统中和在测试系统外的结果. 以金谐振器在测试系统外为参考, 可以看到, 在80~110 GHz频率范围内, 两者区别约为 ± 2 dB, 主要原因是输入输出波导较长, 并且波导连接较多.

3 太赫兹高温超导谐振器表征及分析

本研究所用的YBCO高温超导薄膜采用脉冲激光沉积(pulsed laser deposition, PLD)技术制备, 沉积在厚度为500 μm 的MgO衬底上. YBCO薄膜沉积生长完成后原位镀金. YBCO薄膜及金层厚度均为70 nm, 其超导转变温度约为92 K. 太赫兹高温超导谐振器通过光刻并结合离子束刻蚀完成, 刻蚀过程中保留金层以防止对YBCO薄膜的损伤. 器件制备完成后, 先通过机械抛光将MgO衬底厚度降至200 μm , 再采用湿法刻蚀去除保护金层. 刻蚀金的标准溶液有强氧化性, 而YBCO对许多化学物质极其敏感, 在水汽、酸性/碱性环境下易降解甚至失去超导性. 去金后通过测量YBCO薄膜的 R - T 特性曲线, 验证其去金后在86 K以下仍保持超导特性.

安装在波导腔体里的太赫兹高温超导直通线与谐振器如图5(a)所示. 图5(b)给出了其在4.5 K温度下测得的传输响应曲线. 测试结果表明, 谐振峰清晰可见, 且谐振频率与仿真结果高度一致, 验证了谐振测量系统与器件设计的准确性. 太赫兹超导谐振器的品质因子

(Q 值)达到约140, 通过拟合式(2)得到:

$$|S_{21}|^2 = \frac{a}{1 + 4Q^2x^2}, \quad (2)$$

其中, a 为一个常数, $x = (f - f_0)/f_0$, f_0 为谐振频率.

以直通线为参考, 即

$$\Delta S_{21} = S_{21}^{\text{res}} - S_{21}^{\text{through}}, \quad (3)$$

可以计算得到太赫兹高温超导谐振器的传输特性, 如图5(c)所示. 初步测试结果表明, 在90~100 GHz频段内, YBCO谐振器的 Q 值达到了140, 与常温下的金谐振器相当. 此外, 从图5(c)中可以看到, 在75~90 GHz频段范围内, 太赫兹YBCO谐振器的传输曲线出现了明显纹波, 表明其与谐振测量系统之间存在阻抗失配. 造成这一现象的原因主要包括: 低温下热胀冷缩效应使得波导连接处承受较大应力, 导致接触质量下降; YBCO谐振器芯片的安装存在不可避免的微小偏差, 从而影响波导探针的耦合与阻抗匹配.

图6展示了太赫兹高温超导谐振器谐振曲线随温度的演化情况, 验证了谐振测量系统在不同温度工作的可用性. 可以看到, 随着温度升高, 太赫兹谐振器的 Q 值随之下降; 其中在4~10 K温度范围内, YBCO谐振器的性能变化较小; 当温度升高至30 K以上时, 其损耗显著增加. 该现象的具体机理仍需进一步深入研究.

4 总结与展望

本研究成功搭建了4.5~120 K温区, 75~110 GHz高

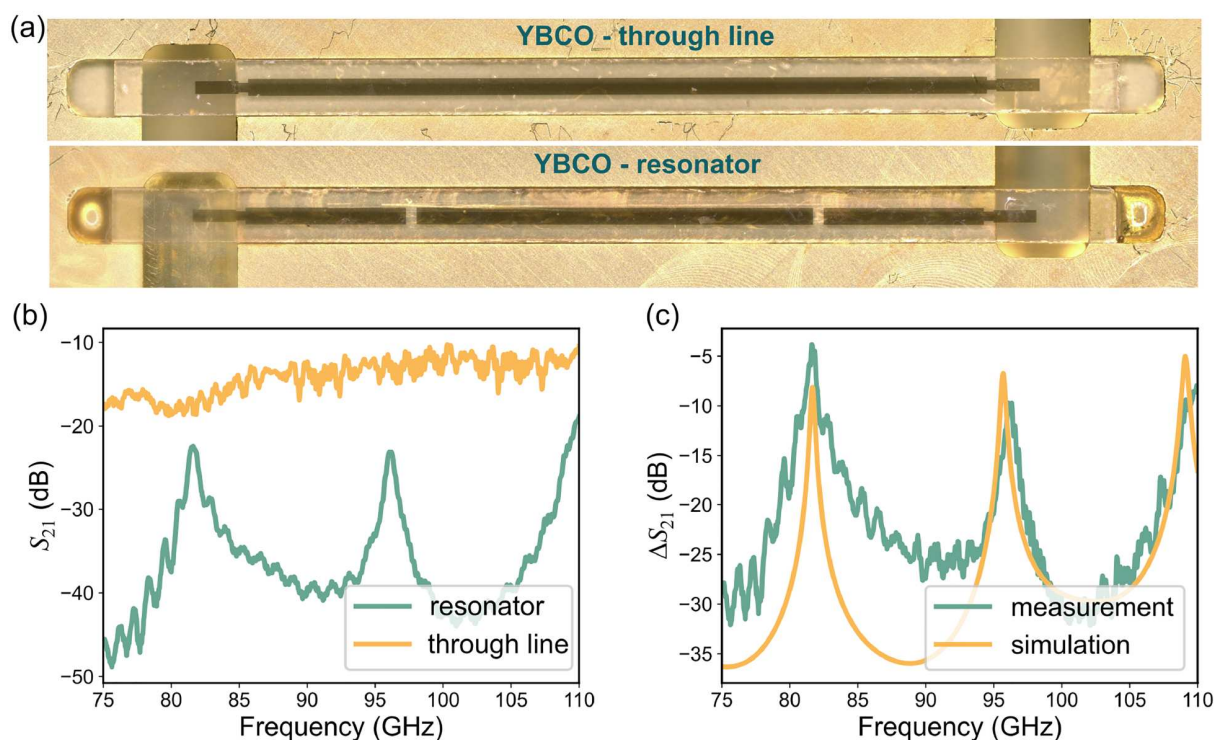


图 5 (网络版彩色)(a) 制备的太赫兹高温超导谐振器. (b) 太赫兹谐振器与直通线在4.5 K的测试结果, 其中仿真值所用的材料为金. (c) 太赫兹谐振器的传输特性与仿真结果比较

Figure 5 (Color online) (a) Fabricated THz high-temperature superconducting resonator. (b) Test results of the THz resonator and through line at 4.5 K, with gold as the reference material for simulation. (c) Comparison between transmission characteristics of the THz resonator and simulation results

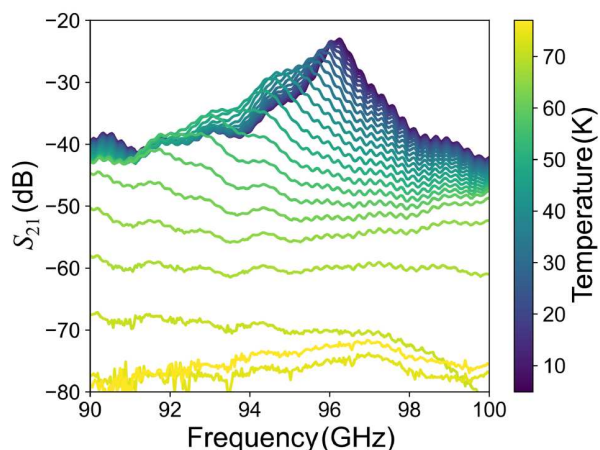


图 6 (网络版彩色)YBCO谐振器的传输特性随温度变化

Figure 6 (Color online) Temperature-dependent transmission characteristics of the YBCO resonator

温超导谐振器谐振特性测试系统, 并初步测试了70 nm厚YBCO谐振器在75~110 GHz波段的谐振特性, 为后续高性能的太赫兹YBCO谐振器表征打下了重要基础. 目前, 谐振测量系统在低温下较大的传输纹波及插入损耗, 严重影响测量精度. 未来将从以下几个方面进一步优化系统性能. 首先, 在波导与制冷机的连接方式上减少机械刚性: 室温端(300 K)波导将通过波纹管连接到制冷机, 在50及4 K处, 波导将采用软铜带连接到制冷机, 以减小热胀冷缩导致的机械应力和接触恶化. 其次, 波导连接部分将引入绝热结构^[15], 减少300 K到4 K的漏热, 以进一步减小不锈钢波导的长度, 提高谐振测量系统的动态范围与测量稳定性. 以上改进措施将有效提升未来太赫兹高温超导谐振器测量的精度与可重复性.

致谢 研究中所用YBCO薄膜由中国科学院物理研究所和松山湖材料实验室提供.

参考文献

- 1 Siegel P H. Terahertz technology. [IEEE Trans Microwave Theor Techn](#), 2002, 50: 910–928
- 2 Treuttel J, Lee C, Kooi J, et al. A novel 300–520 GHz tripler with 50% bandwidth for multi-pixel heterodyne SIS array local oscillator signal generation. In: 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2018. 1–2
- 3 Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Penetrating 3-D imaging at 4- and 25-m range using a submillimeter-wave radar. [IEEE Trans Microwave Theor Techn](#), 2008, 56: 2771–2778
- 4 Gluck A, Rothbart N, Schmalz K, et al. SiGe BiCMOS heterodyne receiver frontend for remote sensing with small satellites. [IEEE Trans THz Sci Technol](#), 2022, 12: 603–610
- 5 Li J, Deng X, Li Y, et al. Terahertz science and technology in astronomy, telecommunications, and biophysics. [Research](#), 2025, 8: 0586
- 6 Lou J, Jiao Y, Yang R, et al. Calibration-free, high-precision, and robust terahertz ultrafast metasurfaces for monitoring gastric cancers. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2022, 119: e2209218119
- 7 Makhlouf S, Cojocari O, Hofmann M, et al. Terahertz sources and receivers: from the past to the future. [IEEE J Microw](#), 2023, 3: 894–912
- 8 Shi S, Li J, Zhang W, et al. Terahertz high-sensitivity superconducting detectors (in Chinese). [Acta Phys Sin](#), 2015, 64: 228501 [史生才, 李婧, 张文, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测器. 物理学报, 2015, 64: 228501]
- 9 Day P K, LeDuc H G, Mazin B A, et al. A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays. [Nature](#), 2003, 425: 817–821
- 10 Jie H, Paul N, Faouzi B, et al. Development of MKIDs in the optical and near-infrared bands for SPIAKID. [J Low Temp Phys](#), 2024, 214: 113–124
- 11 Zhang W J, You L X, Li H, et al. NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2017, 60: 120314
- 12 Chen Z, Li Y, Zhu R, et al. High-temperature superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Josephson junction fabricated with a focused helium ion beam. [Chin Phys Lett](#), 2022, 39: 077402
- 13 Liang X, Ji L, Li T, et al. Synthesis of TI-2223 films, and their, microstructures, superconducting, magnetic, and microwave properties. [J Alloys Compd](#), 2024, 983: 173825
- 14 Pozar D M. Microwave Engineering: Theory and Techniques. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021
- 15 Hesler J, Kerr A, Horner N. A broadband waveguide thermal isolator. In: 2003 International Symposium on Space THz Technology Digest, 2003

Summary for “太赫兹波段高温超导体传输特性表征系统”

Characterization system for terahertz-band transmission properties of high-temperature superconductors

Siyuan Zhao^{1,2}, Jie Hu^{1*}, Qiang Zhi^{1,2}, Jiangqiao Ding¹, Kangmin Zhou¹, Dong Liu¹, Wei Miu¹, Jie Yuan³, Shibing Tian³, Jing Li¹ & Shengcai Shi¹

¹ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China

² School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

³ Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

* Corresponding author, E-mail: jiehu@pmo.ac.cn

The terahertz (THz) frequency range is a vital window for modern astronomy, rich in atomic and molecular transitions that reveal the physical conditions of the interstellar medium and trace key stages of galaxy evolution. Superconducting detectors offer the sensitivity required in this band, but current systems rely mainly on low-temperature superconductors (LTS) such as aluminum, niobium, and niobium nitride. Their required operating temperatures below 4 K necessitate bulky and power-intensive cryogenic systems, greatly limiting the scalability and deployment of large detector arrays, especially for space missions or remote observatories.

To overcome these limitations, this work investigates copper-based high-temperature superconductors (HTS), focusing on yttrium barium copper oxide (YBCO). With a critical temperature over 90 K, YBCO devices could, in principle, operate with simpler liquid-nitrogen cooling, reducing system complexity and cost. Here, we evaluate the conductive loss characteristics of YBCO thin films in the W-band (75–110 GHz), an essential step toward developing practical HTS THz detectors.

We fabricated half-wavelength microstrip resonators from YBCO thin films grown on magnesium oxide (MgO) substrates and developed a dedicated waveguide-coupled measurement system operating from 4.5 K to 120 K. The setup combines a terahertz vector network analyzer with a closed-cycle 4 K cryocooler. Stainless-steel waveguides with gold-plated interiors were employed and thermally anchored to balance transmission loss against heat conduction. A custom vacuum-seal flange with a thin Mylar membrane maintained the cryogenic vacuum while permitting efficient THz transmission. The measured insertion loss of the complete system was approximately 12 dB across 90–105 GHz.

Initial measurements at 4.5 K showed clear resonance peaks whose frequencies agreed well with simulations. The extracted unloaded quality factor ($Q \approx 140$) was comparable to gold resonators tested under identical conditions, confirming the basic operability of YBCO in the W-band. A pronounced temperature dependence was observed: the Q -factor remained stable between 4 K and 10 K but degraded rapidly above 30 K, indicating strong high-frequency loss mechanisms that differ from microwave behaviors and are not explained by the YBCO energy gap alone.

In summary, this work establishes a robust methodology for characterizing HTS thin films in the millimeter-wave regime and demonstrates the initial feasibility of YBCO resonators at W-band frequencies. The results provide essential insight into temperature-dependent losses and lay the foundation for future optimization of YBCO film quality, fabrication techniques, and resonator design, with the long-term goal of enabling practical, high-performance HTS THz detectors.

high-temperature superconductors, YBCO, resonators, terahertz

doi: [10.1360/CSB-2025-5366](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5366)