

高温超导 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 单晶器件的研究与应用进展

魏子涵^{1,2}, 张盟³, 王永磊^{1,2}, 王华兵^{1,2*}, 吴培亨^{1,2}

1. 南京大学超导电子学研究所, 南京 210023

2. 紫金山实验室, 南京 211111

3. 上海航天电子技术研究所, 上海 201100

* 联系人, E-mail: hbwang@nju.edu.cn

2025-08-31 收稿, 2025-11-25 修回, 2025-11-26 接受, 2025-11-27 网络版发表

国家重点研发计划(2021YFA0718802)、国家自然科学基金(62288101, 62274086, 62401647)、中国科学院超导项目(SCZX-0201)、江苏省自然科学基金(BK20240290)和江苏省卓越博士后计划(2024ZB860)资助

摘要 高温超导材料 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO)单晶因其本征约瑟夫森结阵列结构, 在过去三十年间已展现出卓越的研究价值与应用潜力. 近年来, 通过微纳加工技术(低温干法转移、氮化硅硬掩膜、室温高真空原位蒸发、金属局域调控、聚焦氦离子束轰击等)的革新, 实现了界面精准调控与器件性能的跨越式提升. 应用方面取得了一系列进展, 优化了超导辐射源的辐射特性, 实现了宽带调制, 为通信应用开辟了新路径; 有效解决了太赫兹探测器中本征结-天线的融合难题, 研制了高温超导太赫兹探针显微镜; 研究了 25 K 工作温度的超导红外单光子探测器、高温超导二极管等新型器件, 探索了新型量子比特架构. 这些进展为高温超导电子学与微弱信号检测、量子信息科学等前沿领域建立了关键技术纽带. 本综述系统梳理了近五年的主要进展, 探讨了该材料体系器件的未来研究方向.

关键词 高温超导体, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 单晶, 太赫兹辐射与探测, 单光子探测, 超导二极管, 量子比特

超导电子学作为凝聚态物理的重要分支, 其技术发展始终围绕着零电阻效应、完全抗磁性(迈斯纳效应)及约瑟夫森效应等物理特性展开, 在量子信息科学、精密测量、低功耗电子器件、微弱信号检测及计量基准等前沿领域展现出不可替代的技术优势^[1]. 将超导电子器件的工作温度从液氦温区(4.2 K)向液氮温区(77 K)乃至更高温区方向拓展, 不仅将显著降低低温系统的运维成本, 更能与传统半导体技术形成功能互补, 从而为多学科交叉创新提供新的技术路径^[2].

1986年, 瑞士Bednorz与Müller在La-Ba-Cu-O体系中首次发现可能存在35 K的超导现象^[3], 从此揭开了高温超导研究的序幕. 后续研究中, 钇钡铜氧^[4]、铈钇钙铜氧和铋锶钙铜氧^[5]等铜氧化物超导体相继问世, 将超导临界温度(T_c)提升至液氮温区以上. 铁基超导材料体系作为继铜基超导体之后发现的又一个高温超导家

族^[6], 自2008年首次报道以来, 在拓展高温超导机理研究、强磁场应用场景等多领域具有重要研究价值. 2023年, 镍基超导体体系的发现进一步丰富了高温超导材料家族, 其具有与铜基超导体相似的层状晶体结构, 被认为是研究非常规超导机制的重要载体^[7]. 铜基、铁基与镍基等超导材料体系的协同发展, 不仅推动了高温超导基础理论的深化, 更促进了超导电子学技术的革新.

现有高温超导材料中, 铜基超导体钇钡铜氧、铈钇钙铜氧、铋锶钙铜氧等因其独特的材料特性, 已成为超导电子器件研发的核心体系. 其中, 钇钡铜氧和铈钇钙铜氧一般采用薄膜制备工艺, 与传统半导体工艺兼容性良好, 具备器件可集成性及易于阵列化等优势, 已在薄膜器件领域取得系统性研究进展^[8~10]. 而铋锶钙铜氧一般为单晶, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO)单晶的

引用格式: 魏子涵, 张盟, 王永磊, 等. 高温超导 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 单晶器件的研究与应用进展. 科学通报, 2026, 71: 2362–2370

Wei Z, Zhang M, Wang Y-L, et al. Research and application progress of high-temperature superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystal devices (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2362–2370, doi: [10.1360/CSB-2025-5461](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5461)

晶体结构如图1所示^[11],在原子尺度自发形成周期性的本征约瑟夫森结阵列^[12],具备原子级平整解理面、易于三维堆叠等结构优势^[13~17],展现出超高临界电流密度与多维度集成的潜力,为太赫兹辐射源/探测器、单光子探测、超导二极管、量子计算等前沿领域提供了独特的技术路径。本文系统梳理近五年BSCCO单晶器件在制备工艺与应用场景中的关键技术进展,并探讨其面临的核心挑战与未来的发展方向。

1 制备技术的突破

高温超导电子学的发展与器件制备技术的革新密切相关。1992年,德国科学家Kleiner R.在平台结构的BSCCO单晶器件中首次证实本征约瑟夫森效应的存在^[12],为后续研究奠定了重要基础。1999年,Yamashita T.研究组利用聚焦离子束加工技术(focused ion beam, FIB),成功在BSCCO晶须中制备出具有双面结构的BSCCO堆叠器件^[18]。2001年,王华兵等人发明双面结制备技术^[19],利用BSCCO本征结实现2.5 THz的高频探测^[13],首次验证了BSCCO单晶器件在太赫兹波段的应用潜力。2005年,赵士平课题组提出原位低温解理技术^[20],将BSCCO表面本征结的超导转变温度提高至液氮温度以上,并成功在表面结中观测到宏观量子隧穿效应^[21],为超导量子器件的研制提供了新思路。2007

年,Ozyuzer团队进一步在BSCCO本征结中实现了可调谐太赫兹辐射^[22]。2014年,王华兵团队开发“三明治”结构的辐射源,使得辐射频率在国际上首次突破1 THz^[23]。这一系列的技术突破表明,BSCCO本征结的制备技术已趋于成熟,为本征结相关的应用奠定了坚实的基础。

近年来,随着对铜氧化物超导体微观机理研究的深入及其在微弱信号探测、量子计算等场景的应用潜能^[24],高温超导BSCCO单晶器件逐渐朝向低维方向发展:垂直维度追求少层甚至单层的原子级厚度,水平维度则需实现纳米级精度加工。然而,BSCCO单晶虽在块材状态下表现出优异的环境稳定性,但当其厚度减小至约10 nm量级、横向尺寸缩减至纳米尺度时^[25],与水蒸气的快速反应以及氧元素流失(相同的退化途径也存在于大块晶体中)会直接导致超导临界温度的急剧下降或完全消失,这对器件制备提出原子级的界面稳定性要求。

本节将聚焦最新的五种关键技术突破:低温干法转移技术、SiN硬掩模技术、室温高真空原位蒸发技术、金属局域调控技术与聚焦氦离子束轰击技术,重点分析各技术的关键工艺流程与解决的核心难题。

1.1 低温干法转移技术

传统机械剥离法制备的少层BSCCO单晶普遍存在超导性退化甚至完全丧失的问题。为此,研究人员开发了一种基于惰性气氛保护的低温干法转移技术,通过控制环境气氛与操作温度,成功实现了高质量少层与单层BSCCO单晶薄片^[26,27]以及BSCCO转角结的可控制备^[28,29]。

此技术需严格遵循“预处理-低温解理-保护封装”的操作流程。首先,在氩气手套箱($O_2/H_2O < 0.1$ ppm)内利用液氮冷台($-120^\circ\text{C} \sim \text{RT}$)实现低温惰性环境系统,从根本上抑制BSCCO单晶薄片的氧流失和水分吸附所造成的超导特性退化的问题。其次,开发基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)媒介的玻璃化相变解理工艺,在 -120°C 进行剥离与转移,将单晶薄片解理时间压缩至1分钟内,防止材料因升温发生界面退化。最后,通过六方氮化硼 h -BN绝缘层原位封装,有效提高单晶薄片超导特性的稳定性。此外,通过集成精密旋转台可保证 $\pm 0.5^\circ$ 的角度控制,实现高质量BSCCO转角结的制备^[30,31]。

相较于传统机械剥离,该技术使BSCCO薄片的超导临界温度几乎可以与体单晶保持一致。目前已成功

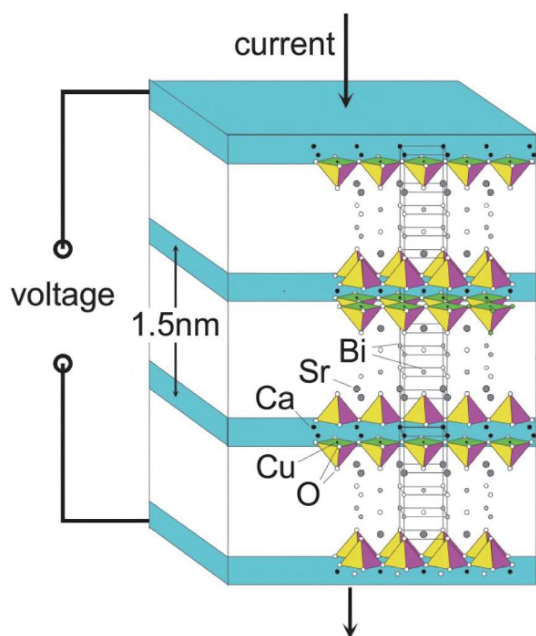


图1 BSCCO单晶晶体结构示意图^[11]

Figure 1 Crystal structure of BSCCO single crystal^[11]

应用于铜基超导机理研究、超导二极管及量子器件等领域,特别在制备高质量超薄BSCCO单晶薄片时展现出不可替代的技术优势。

1.2 SiN硬掩模技术

针对传统紫外/电子束光刻工艺中聚合物溶剂对BSCCO单晶表面化学侵蚀造成的薄层单晶超导特性退化问题, BSCCO薄片单晶器件通常采用“先电极后转移”的工艺路线。为解决某些特殊场景中顶部电极的制备需求,逐步发展了SiN硬掩模技术,如图2(a)所示^[32]。

其核心技术流程包含三个关键步骤: 首先进行掩膜制备, 采用LPCVD法生长具有300 μm 硅芯支撑结构的500 nm低应力SiN双层膜, 通过氢氧化钾溶液选择性蚀刻形成悬空结构, 并选用反应离子刻蚀(1 μm 分辨率)或镓离子束刻蚀(200 nm分辨率)在SiN膜上完成电极图形转移; 然后进行基片预处理, 在对基片完成丙酮-异丙醇超声清洗后, 需进行275 $^{\circ}\text{C}$, 24 h氩气烘烤工艺以去除基片表面的吸附水; 最终的集成工艺采用低温干法转移技术完成SiN硬掩模与BSCCO单晶薄片的

显微对准(定位精度 $\approx 1\ \mu\text{m}$), 然后结合热蒸发技术完成金属电极沉积。

该技术通常需要与低温干法转移技术协同使用, 主要优势在于避免了有机溶剂对BSCCO单晶表面的损伤, 同时通过悬空掩模结构实现了亚微米级图形分辨率, 在高温超导单晶薄片器件、转角结器件等对电极界面完整性要求严苛的领域展现出独特应用价值。

1.3 室温高真空原位蒸发技术

室温高真空原位蒸发技术的产生源于传统电极制备中单晶解理与金属沉积异步导致的BSCCO单晶界面退化的难题^[33]。其技术流程包含以下核心操作: 首先通过聚酰亚胺胶等绝缘胶将BSCCO单晶固定于衬底表面, 在单晶上方覆盖Scotch胶带, 胶带一端连接至热蒸发仪挡板; 在优于 2×10^{-8} Torr的极限真空环境的热蒸发仪中建立稳定金属气氛(金属沉积速率6~26.9 nm/s); 最终通过控制挡板的开关, 实现BSCCO单晶表层的解理面暴露与金属沉积的毫秒级同步, 关键操作如图2(b)所示。

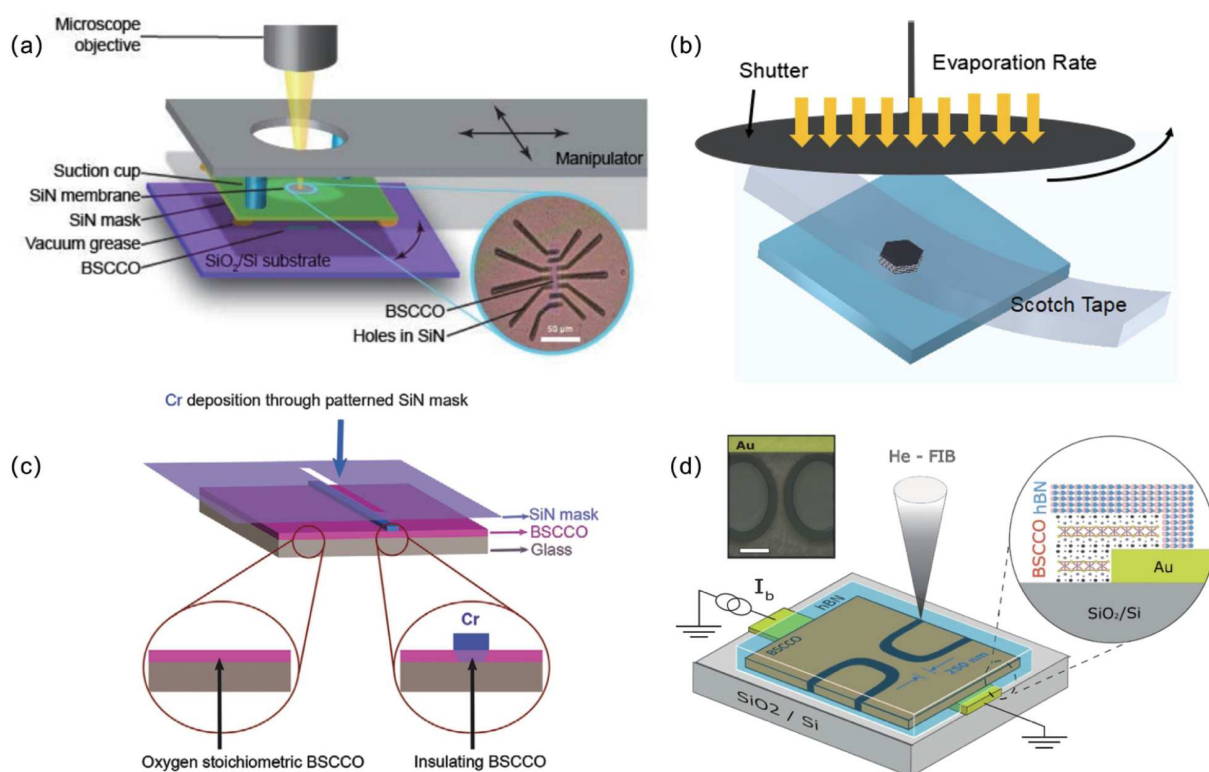


图2 BSCCO单晶器件制备技术示意图。(a) SiN硬掩模技术^[32]; (b) 室温高真空原位蒸发技术; (c) 金属局域调控技术^[34]; (d) 聚焦氦离子束轰击技术^[36]

Figure 2 Schematic diagram of fabrication technology for BSCCO single crystal devices. (a) Stencil mask technique by SiN^[32]; (b) high-vacuum in situ evaporation technique at room temperature; (c) metal local regulation technology^[34]; (d) helium focused ion beam (He-FIB) technology^[36]

该技术具有三个优点: (1) 通过控制蒸镀速率, 可使单晶表层超导特性实现从完全退化到“零损伤”的连续调控; (2) 原位构筑的金-BSCCO界面的电阻率较传统工艺降低2~3个数量级; (3) 在室温下进行操作, 与光刻、离子束刻蚀等微纳加工技术兼容性良好, 已成功应用于高温超导太赫兹探测器、高温超导本征二极管的制备。

1.4 金属局域调控技术

SiN硬掩模辅助的金属沉积技术除了可以在BSCCO单晶薄片顶部沉积金电极外, 也可通过局域沉积不同性质的金属材料, 对BSCCO单晶薄片超导特性进行选择调控^[34], 实现BSCCO单晶薄片的亚微米级超导图案化。如图2(c)所示, BSCCO单晶薄片表面沉积高活性铬(Cr)会导致CuO₂平面氧化学计量比失衡, 引发晶体氧浓度显著降低, 使超导区域转变为绝缘态; 沉积与金属Cr活性相当但非磁性的钛(Ti)仅能引起超导临界温度降低。

相较于传统离子掺杂/刻蚀技术, 本方法具有以下优势: (1) 避免复杂光刻工艺与离子轰击损伤; (2) 实现微创性局域调控(作用深度<50 nm); (3) 保持晶体结构完整性。该技术为开发高温超导电子器件(包括但不限于超导测辐射热仪、太赫兹探测器及光电探测器)提供了新型图案化解决方案^[35], 其700 nm的最小特征尺寸已满足多数器件加工需求。

1.5 聚焦氦离子束轰击技术

聚焦氦离子束轰击(He-FIB)技术是实现BSCCO单晶薄片纳米级图案化的另一种有效方法。其核心机制如图2(d)所示, 通过局部辐照来调控单晶薄片的超导特性^[25,36]。实验研究表明, 受氦离子辐照可使BSCCO晶格特定区域发生绝缘化转变, 而未辐照区域仍保持高临界温度的超导特性。通过剂量控制可实现<100 nm的横向加工精度, 支持复杂纳米线结构的制备, 而且合适剂量的辐照在调控单晶薄片超导性能的同时, 不会破坏h-BN、Al₂O₃等绝缘保护层结构完整性。相较于传统蚀刻工艺, 可避免纳米线侧向暴露导致的超导特性退化问题。因此, 辐照剂量的选择对FIB的效果起决定性作用, 针对BSCCO单晶器件结构由二维转移工艺带来的不确定性, 首先需要根据单晶与保护层的厚度等参数在SRIM软件进行辐射剂量仿真, 而后在每个样品的非核心区域, 进行辐射剂量的矫正。在获得合适的剂量

后, 再在核心区域进行目标图形的制备。此外, 辐射剂量与扫描方式(如线扫描、面扫描)密切相关, 不同的扫描方式会导致离子束在样品表面的分布和能量沉积方式发生变化, 进而影响辐射剂量的实际效果, 如文献^[36]中, 当BSCCO单晶厚度为10~20 nm, 上方h-BN的厚度为20 nm时, 辐射剂量范围为20~90 pC, 成功制备了线宽为250 nm、长度为2.7 μm的BSCCO纳米线。目前该技术已成功应用于高温超导纳米线单光子探测器的制备, 展现了其在超导器件领域的重要应用价值。

1.6 其他制备技术

除前述五种制备技术外, 研究证实真空退火与臭氧退火的协同处理可对单层BSCCO单晶的氧含量进行精确调控, 进而完成从过掺杂态到莫特绝缘态的全相图连续转变^[27]。低温刻蚀技术可有效缓解刻蚀过程对BSCCO单晶侧壁造成的损伤。

基于现有实验数据与理论分析, 本文认为BSCCO单晶器件制备工艺的选择与优化需重点关注以下两个方面: (1) 化学隔离, 尽量避免单晶表层及侧壁等界面与空气、H₂O、有机溶剂(如丙酮、乙醇)等物质接触。(2) 界面保护, 尽量在惰性气氛及低温环境下进行界面操作, 并尽可能缩短界面裸露时间, 及时对单晶界面进行封装保护。

2 应用开发与拓展

高温超导器件制备技术的突破显著推动了应用的发展。在传统应用领域, 太赫兹辐射与探测技术表现出从基础研究向工程应用的发展趋势, 新兴应用则实现了多领域的开创性突破。

2.1 太赫兹辐射

BSCCO单晶中的本征约瑟夫森结阵列通过量子相位相干机制, 可实现直流偏置电压向高频相干电磁辐射的高效转换。自2007年*Science*首次报道该技术突破以来^[22], 其性能参数已实现系统性提升: 频率调谐范围覆盖0.1~11 THz宽频段, 频谱纯度达到1 Hz@563 GHz的超窄线宽^[37], 辐射效率在4 THz频点提升至12%^[38], 最高工作温度提升至86 K^[39], 展现出显著的应用潜力。

近五年的研究可归纳为三个方面: 物理机制深化方面, 美国阿贡国家实验室发展的微纳传感结原位监测技术, 通过实时电学探测热点空间分布, 建立了结阵列热-电耦合模型与辐射特性调控的定量关系^[40]。日本

物质材料研究机构(NIMS)提出的晶须交叉结(CW-IJJ)结构辐射源,打破了传统平行结的谐振腔尺寸限制,为紧凑型定向辐射源设计提供了新范式^[41].性能指标突破方面,德、俄、中联合项目实现毫瓦级连续波输出^[42].日本筑波大学通过创新性结构设计,构筑了小尺寸BSCCO平台与外部谐振器的强耦合系统,实现了高达1.5 THz的谐振频率,为辐射源的性能优化提供新的路径^[43].应用场景方面,英国格拉斯哥大学开发千兆赫兹调幅(AM)调制发射器^[44].日本京都大学通过调制本征结阵的偏置电压,实现了辐射频率的调制.当3 GHz正弦波叠加在由本征结辐射的840~890 GHz载波上时,实现了高达40 GHz的调频(FM)带宽^[45],为高温超导辐射源在太赫兹频段通信系统的应用奠定了基础.

当前,BSCCO太赫兹辐射源已展现出从基础研究向产业应用的发展趋向,其性能优化与系统集成研究将持续推动太赫兹技术迈向新高度.

2.2 太赫兹探测

太赫兹探测也是太赫兹技术的关键组成部分.研究表明,基于BSCCO单晶制备的太赫兹探测器表现出优异的探测性能:在760 GHz频率辐射条件下呈现高响应灵敏度,可观测到陡峭的零交叉夏皮洛台阶^[46];在2.5 THz高频辐射下仍能保持清晰的夏皮洛台阶特征^[13].特别值得注意的是,该探测器在1.6 THz辐射条件下实现了高达90次的谐波混频^[47].

近几年来,南京大学王华兵团队在该领域进行持续深入探究:(1)通过将室温高真空原位蒸发技术与传统微纳加工技术相结合,成功开发出集成大尺寸天线的高温超导太赫兹探测器,实现了90~110 GHz、190~230 GHz以及640~660 GHz宽频段微弱信号的探测.(2)研制出高温超导本征结探针,并配套开发了具有自动化扫描成像功能的探针显微镜系统^[48],系统如图3(a)所示,检测频段可覆盖从微波至太赫兹的宽频谱范围;在维持高温超导探针正常工作状态下,该系统可对6~300 K温区内待测样品的电磁场分布进行精确表征,图3(b)为高温超导探针对共面波导表面电磁场分布的成像结果,可清晰分辨驻波信号.这些研究成果为BSCCO太赫兹探测器在天文观测、芯片表征等场景的应用奠定了坚实的基础.

2.3 单光子探测

超导纳米线单光子探测器(SNSPD)是利用超导材

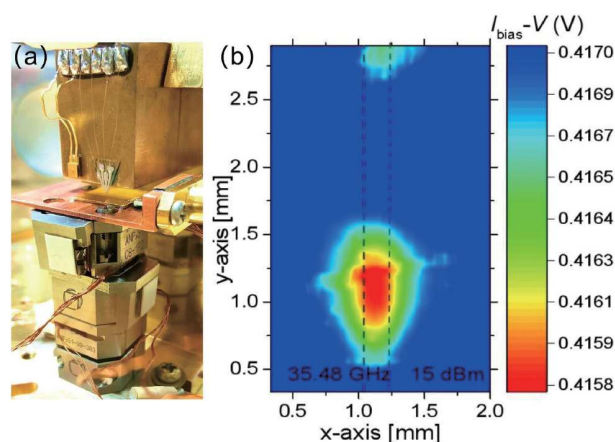


图3 高温超导本征结探针扫描成像系统。(a)制冷机内系统实物图;(b)高温超导探针对共面波导电磁场分布的成像结果^[48]

Figure 3 Three-dimensional imaging system with an intrinsic Josephson junction probe. (a) Internal system diagram of refrigeration; (b) field distribution imaging of a CPW by a high-temperature probe^[48]

料的零电阻效应和纳米线局域非平衡态机制实现的光电转换器件.该技术凭借其在近红外波段(特别是1550 nm通信窗口)展现出的卓越性能指标——高探测效率、高计数率、极低暗计数以及低时间抖动等特性,已成为当前近红外波段综合性能最优异的单光子探测方案.

传统SNSPD通常需要在液氦温区(<4.2 K)工作,而采用高温超导材料实现10 K以上工作温度的单光子探测器,可大幅降低制冷系统的复杂度与能耗.2023年,该领域取得里程碑式突破:麻省理工学院研究团队通过机械剥离结合聚焦氦离子束微纳加工技术,基于BSCCO单晶材料体系,首次在25 K工作温度下实现了对1.5 μm 通信波长的单光子响应,创造了当前公开报道的最高工作温度纪录^[25].同年,西班牙团队采用相同工艺路线,也在20 K温区实现了对电信波段单光子的稳定探测^[36].此外,匈牙利团队通过数值优化设计了集成等离子体纳米结构的BSCCO超导纳米线,显著提升1550 nm波段的光吸收效率^[49].国内电子科技大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所^[50]、南京大学等研究机构也在积极开展高温超导单光子探测器件制备技术研究.高温超导单光子探测技术的突破性进展,将有望为构建新一代量子通信网络、发展深空光通讯等提供关键技术支撑.

2.4 超导二极管

超导二极管效应是一种新型的量子输运现象,表

现为超导态下库珀对的单向输运特性,其电流-电压曲线呈现显著的非对称性.自2020年提出以来^[51],超导二极管效应已在多种超导体系中得到实验验证,包括超晶格结构、纳米孔超导薄膜、二维电子气势垒约瑟夫森结、范德华异质结构等.

当前高温超导二极管研究主要集中在BSCCO材料体系.2023年末,基于转角BSCCO单晶器件首次实现高温超导二极管,标志着该研究领域进入新的发展阶段^[52].随后,印度团队系统研究了BSCCO转角结中的超导二极管效应,通过非互易性随扭转角度、工作温度、外磁场等的变化关系,揭示了其中二极管效应源于约瑟夫森涡旋与阿布里科索夫涡旋的相互作用,为高温超导量子器件与拓扑超导研究开辟了新方向^[53].国内在此领域也已取得突破性进展:北京大学王健团队在BSCCO薄膜中实现了72 K的零场超导二极管效应^[54];清华大学张定团队在45°扭角BSCCO结中实现了超导二极管效应^[55];南京大学王华兵团队开发了基于BSCCO本征结的超导二极管结构,器件工艺路线具备阵列化的潜力^[56].

高温超导二极管的研究正处于快速发展阶段,随着对物理机制的深入理解,以及器件工艺的优化,未来将向功能器件、逻辑电路等方向发展,进而为超导电子学、自旋电子学及量子通信等多领域的创新提供新的平台.

2.5 其他应用

除上述已实现的高温超导BSCCO单晶器件的应用外,研究人员还通过理论与仿真预测了BSCCO单晶器件在量子比特方向的应用潜能:加拿大团队基于BSCCO单晶体系提出一种 d 波与 s 波超导体平面隧道结的新型量子比特架构^[57],等效电路与样品结构如图4(a),(b)所示,理论分析表明其约瑟夫森自由能呈现 π 周期性和双势阱特征,导致高度可调的非谐性,为发展兼具高操作速度与长相干时间的量子处理器提供了新路径.同年,意大利团队提出在超导量子干涉器件(SQUID)回路中集成BSCCO转角结,可实现一种高度可调谐的量子器件,如图4(c),(d)所示^[58].在磁通偏置机制下,超导序参数固有的扭转 d 波特性与外部磁通之间的相互作用,使得实现新型量子比特成为可能.

3 总结与展望

近五年来,高温超导电子学领域取得了突破性进

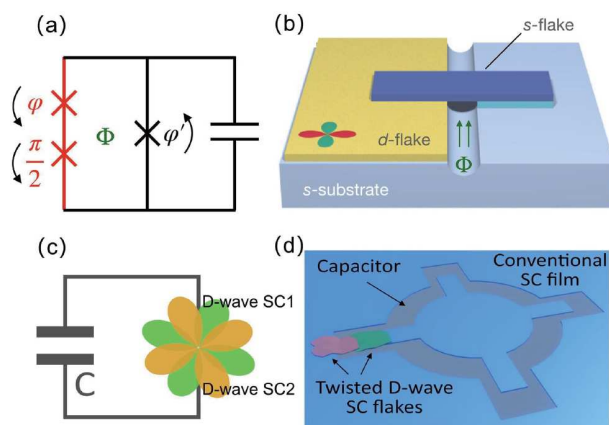


图4 两种量子比特理论提案示意图. (a), (b) d-Mon量子比特的等效电路图与样品结构示意图^[57]; (c), (d) flowermon量子比特的等效电路图与样品结构示意图^[58]

Figure 4 Schematic diagrams of two quantum bit theory proposals. (a), (b) Equivalent circuit diagram and sample structure schematic of d-Mon quantum bit^[57]. (c), (d) Equivalent circuit diagram and sample structure schematic of flowermon quantum bit^[58]

展,呈现出多元化发展态势,在制备技术、太赫兹辐射技术、探测技术及新兴应用等方面均取得了显著成果.

在制备技术层面,二维材料制备与微纳加工技术的协同创新,推动了BSCCO单晶器件制备技术的重大突破.低温干法转移技术的成功应用,实现了原子级薄层材料的无损转移. SiN硬掩膜与室温高真空原位蒸发技术构建了多场景适配的电极制备技术.金属局域调控技术与氦离子束轰击技术的引入,实现了纳米级晶格精确调控,标志着高温超导电子器件加工技术迈入新阶段.在太赫兹辐射技术方面,通过性能优化与技术创新,本征结辐射源展现出通信发射端的应用潜力,为太赫兹通信技术的发展提供了新的可能.在探测技术领域,突破了本征结与天线结构的融合壁垒,成功研制出高温超导探针显微镜系统,为芯片表征提供了创新解决方案.值得注意的是,新兴应用展现出更强的学科交叉特征.例如,25 K工作温度的红外超导单光子探测器的成功研制,突破了传统低温探测器的工作温区限制,为深空通信等领域提供了新的高灵敏度解决方案.同时,高温超导二极管的快速发展和新型量子比特理论模型的提出,不仅丰富了高温超导电子学的理论框架,更构建了与量子信息、微弱信号探测等前沿领域协同发展的技术桥梁,推动了多学科交叉融合的深入发展.

展望未来,这些突破性成果为高温超导电子学在太赫兹技术的实用化进程奠定了坚实的基础,同时为深空通信、低功耗逻辑电路、量子计算、微弱信号探

测等前沿领域开辟了新路径。这些技术突破不仅推动了跨尺度集成、多物理场耦合等应用场景的拓展,更是展现了高温超导电子学在多学科交叉融合背景下的广阔应用前景和持续发展活力。

参考文献

- 1 Li C G, Wang J, Wu Y, et al. Recent progress of superconducting electronics in China. *Acta Phys Sin*, 2021, 70: 018501
- 2 Zhang Y. Superconducting Physics (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1997 [张裕恒. 超导物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997]
- 3 Bednorz J G, Müller K A. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Z Physik B-Condensed Matter*, 1986, 64: 189–193
- 4 Zhao Z, Chen L, Yang Q, et al. Superconductivity in Ba-Y-Cu-O system at liquid nitrogen temperature range (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1987, 32: 412–414 [赵忠贤, 陈立泉, 杨乾声, 等. Ba-Y-Cu氧化物液氮温区的超导电性. 科学通报, 1987, 32: 412–414]
- 5 Michel C, Hervieu M, Borel M M, et al. Superconductivity in the Bi-Sr-Cu-O system. *Z Physik B-Condensed Matter*, 1987, 68: 421–423
- 6 Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, et al. Iron-based layered superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05\text{--}0.12$) with $T_c = 26$ K. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 3296–3297
- 7 Zhou G, Lv W, Wang H, et al. Ambient-pressure superconductivity onset above 40 K in $(\text{La,Pr})_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ films. *Nature*, 2025, 640: 641–646
- 8 Gao X, Du J, Zhang T, et al. Noise and conversion performance of a high- T_c superconducting Josephson junction mixer at 0.6 THz. *Appl Phys Lett*, 2017, 111: 192603
- 9 Arpaia R, Ejrnaes M, Parlato L, et al. Highly homogeneous YBCO/LSMO nanowires for photoresponse experiments. *Supercond Sci Technol*, 2014, 27: 044027
- 10 Guo R, Duan S, He Z, et al. Josephson plasmon resonance in $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ high-temperature superconductor tunable terahertz metamaterials. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2106891
- 11 Kleiner R, Wang H. Terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ intrinsic Josephson junction stacks. *J Appl Phys*, 2019, 126: 171101
- 12 Kleiner R, Steinmeyer F, Kunkel G, et al. Intrinsic Josephson effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystals. *Phys Rev Lett*, 1992, 68: 2394–2397
- 13 Wang H B, Wu P H, Yamashita T. Terahertz responses of intrinsic Josephson junctions in high T_c superconductors. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 107002
- 14 Delfanazari K, Asai H, Tsujimoto M, et al. Terahertz oscillating devices based upon the intrinsic Josephson junctions in a high temperature superconductor. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2013, 35: 131–146
- 15 Liao M, Zhu Y, Zhang J, et al. Superconductor–insulator transitions in exfoliated $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ flakes. *Nano Lett*, 2018, 18: 5660–5665
- 16 Welp U, Kadowaki K, Kleiner R. Superconducting emitters of THz radiation. *Nat Photon*, 2013, 7: 702–710
- 17 Borodianskyi E A, Krasnov V M. Josephson emission with frequency span 1–11 THz from small $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa structures. *Nat Commun*, 2017, 8: 1742
- 18 Latyshev Y I, Kim S J, Yamashita T. Fabrication of submicron BSCCO stacked junctions by focused ion beam (FIB). *IEEE Trans Appl Supercond*, 1999, 9: 4312–4315
- 19 Wang H B, Wu P H, Yamashita T. Stacks of intrinsic Josephson junctions singled out from inside $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ single crystals. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 4010–4012
- 20 Zhao S P, Zhu X B, Wei Y F, et al. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions: surface layer characterization and control. *Phys Rev B*, 2005, 72: 184511
- 21 Li S X, Qiu W, Han S, et al. Observation of macroscopic quantum tunneling in a single $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ surface intrinsic Josephson junction. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 037002
- 22 Ozyuzer L, Koshelev A E, Kurter C, et al. Emission of coherent THz radiation from superconductors. *Science*, 2007, 318: 1291–1293
- 23 Ji M, Yuan J, Gross B, et al. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: coherent emission above 1 THz. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 122602
- 24 Confalone T, Lo Sardo F, Lee Y, et al. Cuprate twistrionics for quantum hardware. *Adv Quantum Tech*, 2025, 8: 2500203
- 25 Charaev I, Bandurin D A, Bollinger A T, et al. Single-photon detection using high-temperature superconductors. *Nat Nanotechnol*, 2023, 18: 343–349
- 26 Patil V, Ghosh S, Basu A, et al. Pick-up and assembling of chemically sensitive van der Waals heterostructures using dry cryogenic exfoliation. *Sci Rep*, 2024, 14: 11097
- 27 Yu Y, Ma L, Cai P, et al. High-temperature superconductivity in monolayer $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Nature*, 2019, 575: 156–163
- 28 Zhu Y, Liao M, Zhang Q, et al. Presence of s -wave pairing in Josephson junctions made of twisted ultrathin $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ flakes. *Phys Rev X*, 2021, 11: 031011

- 29 Martini M, Lee Y, Confalone T, et al. Twisted cuprate van der Waals heterostructures with controlled Josephson coupling. *Mater Today*, 2023, 67: 106–112
- 30 Lee J, Lee W, Kim G Y, et al. Twisted van der Waals Josephson junction based on a high- T_c superconductor. *Nano Lett*, 2021, 21: 10469–10477
- 31 Lee Y, Martini M, Confalone T, et al. Encapsulating high-temperature superconducting twisted van der Waals heterostructures blocks detrimental effects of disorder. *Adv Mater*, 2023, 2209135
- 32 Zhao S Y F, Poccia N, Panetta M G, et al. Sign-reversing Hall effect in atomically thin high-temperature $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_{2.0}\text{O}_{8+\delta}$ superconductors. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 247001
- 33 Wei Z, Du H, Li D, et al. Tailoring $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ surface Josephson junctions. *Appl Phys Lett*, 2023, 122: 112601
- 34 Ghosh S, Vaidya J, Datta S, et al. On-demand local modification of high- T_c superconductivity in few unit-cell thick $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Adv Mater*, 2020, 32: 2002220
- 35 Ghosh S, Jangade D A, Deshmukh M M. Nanowire bolometer using a 2D high-temperature superconductor. *Nanotechnology*, 2023, 34: 015304
- 36 Merino R L, Seifert P, Retamal J D, et al. Two-dimensional cuprate nanodetector with single telecom photon sensitivity at $T = 20$ K. *2D Mater*, 2023, 10: 021001
- 37 Koshelets V P, de Lange A, de Lange G, et al. Superconducting integrated terahertz spectrometers. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2015, 5: 687–694
- 38 Cattaneo R, Borodianskyi E A, Kalenyuk A A, et al. Superconducting terahertz sources with 12% power efficiency. *Phys Rev Appl*, 2021, 16: L061001
- 39 Sun H, Wieland R, Xu Z, et al. Compact high- T_c superconducting terahertz emitter operating up to 86 K. *Phys Rev Appl*, 2018, 10: 024041
- 40 Zhou X, Han X, Koelle D, et al. On-chip sensing of hotspots in superconducting terahertz emitters. *Nano Lett*, 2020, 20: 4197–4203
- 41 Saito Y, Adachi S, Matsumoto R, et al. THz emission from a $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ cross-whisker junction. *Appl Phys Express*, 2021, 14: 033003
- 42 Wieland R, Kizilaslan O, Kinev N, et al. Terahertz emission from mutually synchronized standalone $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ intrinsic-Josephson-junction stacks. *Phys Rev Appl*, 2024, 22: 044022
- 43 Ono Y, Minami H, Kuwano G, et al. Superconducting emitter powered at 1.5 terahertz by an external resonator. *Phys Rev Appl*, 2020, 13: 064026
- 44 Delfanazari K. On-chip coherent terahertz emitters with gigahertz modulation. *Nat Photon*, 2024, 18: 214–215
- 45 Miyamoto M, Kobayashi R, Kuwano G, et al. Wide-band frequency modulation of a terahertz intrinsic Josephson junction emitter of a cuprate superconductor. *Nat Photon*, 2024, 18: 267–275
- 46 Wang H B, Wu P H, Chen J, et al. Three-dimensional arrays of BiSrCaCuO -2212 intrinsic Josephson junctions and zero-crossing Shapiro steps at 760 GHz. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1604–1606
- 47 Wang H B, You L X, Chen J, et al. Observation of Shapiro steps and spectroscopic applications of stacked intrinsic Josephson junctions up to the terahertz region. *Supercond Sci Technol*, 2002, 15: 90–93
- 48 Wei Z, Zhang P, Lyu Y-Y, et al. Microscope for electromagnetic field distribution imaging with intrinsic Josephson junctions. In: 48th IRMMW-THz, 2023
- 49 Szenes A, Pothorcki L, Bánhelyi B, et al. Plasmonic structure integrated superconducting nanowire single-photon detector with BSCCO stripes. 2024. arXiv: 2411.09630
- 50 Yu A B, Huang Z, Peng W, et al. Fabrication and transport properties of two dimensional $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ micro-bridge. *Appl Phys Lett*, 2022, 120: 072601
- 51 Ando F, Miyasaka Y, Li T, et al. Observation of superconducting diode effect. *Nature*, 2020, 584: 373–376
- 52 Zhao S Y F, Cui X, Volkov P A, et al. Time-reversal symmetry breaking superconductivity between twisted cuprate superconductors. *Science*, 2023, 382: 1422–1427
- 53 Ghosh S, Patil V, Basu A, et al. High-temperature Josephson diode. *Nat Mater*, 2024, 23: 612–618
- 54 Qi S, Ge J, Ji C, et al. High-temperature field-free superconducting diode effect in high- T_c cuprates. *Nat Commun*, 2025, 16: 531
- 55 Zhu Y, Wang H, Wang Z, et al. Persistent Josephson tunneling between $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ flakes twisted by 45° across the superconducting dome. *Phys Rev B*, 2023, 108: 174508
- 56 Wei Z, Qiao Y, Lyu Y-Y, et al. Scalable high-temperature superconducting diodes in intrinsic Josephson junctions. 2025. arXiv: 2508.06083
- 57 Patel H, Pathak V, Can O, et al. d -Mon: a transmon with strong anharmonicity based on planar c -axis tunneling junction between d -wave and s -wave superconductors. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 017002
- 58 Brosco V, Serpico G, Vinokur V, et al. Superconducting qubit based on twisted cuprate Van der Waals heterostructures. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 017003

Summary for “高温超导 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 单晶器件的研究与应用进展”

Research and application progress of high-temperature superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystal devices

Zihan Wei^{1,2}, Meng Zhang³, Yong-Lei Wang^{1,2}, Huabing Wang^{1,2*} & Peiheng Wu^{1,2}

¹ Research Institute of Superconductor Electronics (RISE), Nanjing University, Nanjing 210023, China

² Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

³ Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201100, China

* Corresponding author, E-mail: hbwang@nju.edu.cn

The high-temperature superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) single crystal devices, with their unique intrinsic Josephson junction array structure, have demonstrated remarkable research value and application potential over the past three decades. In the past five years, the field has achieved breakthrough progress, showing a diversified development trend, with significant results in fabrication technology, terahertz radiation technology, detection technology, and emerging applications, etc. In terms of fabrication technology, the collaborative innovation of two-dimensional material fabrication technology and micro/nano fabrication technology has driven a breakthrough in the fabrication technology of BSCCO single crystal devices. This paper systematically elaborates on the challenges to be addressed, fabrication process flow, core competitive advantages, and application scenarios of each core technology. The successful application of cryogenic dry transfer technology has achieved lossless transfer of atomic-level thickness materials, laying a solid foundation for the preparation of high-quality BSCCO single-crystal devices. The silicon nitride hard mask and room-temperature high-vacuum *in-situ* evaporation technology have established an electrode preparation process system suitable for multiple scenarios, significantly improving the stability and success rate of sample preparation. The introduction of localized metal deposition technology and focused helium ion beam irradiation technology has achieved precise control of nano-scale lattice structures, providing key technical support for further improving device performance, marking the entry of high-temperature superconducting electronic device fabrication technology into a new stage. In addition, this paper introduces breakthroughs in the application expansion of BSCCO crystal devices in detail. In the field of terahertz radiation technology, performance optimization and technological innovation have shown potential in communication transmitter applications, providing new possibilities for the development of terahertz communication technology. In the field of detection technology, the technological barrier of integrating an intrinsic junction and antenna structure integration has been overcome. Researchers successfully developed a high-temperature superconducting probe microscope system, which provides an innovative solution for chip characterization. It is noteworthy that emerging applications exhibit stronger interdisciplinary characteristics. For example, the infrared superconducting single-photon detector operating at 25 K has broken through the working temperature limitations of traditional low-temperature superconducting detectors, offering a new high-sensitivity solution for national strategic fields such as deep-space communication. At the same time, the rapid development of high-temperature superconducting diodes and the proposal of new quantum bit theoretical models have not only enriched the theoretical framework of high-temperature superconducting electronics but also built a bridge for technological collaborative development with frontier fields such as quantum information and weak signal detection, promoting the deepening of interdisciplinary integration. Finally, this paper discusses future research directions for devices in this material system. The above breakthrough achievements have not only laid a solid foundation for the practical application of high-temperature superconducting electronics in terahertz technology, but also opened up new paths for frontier fields such as deep-space communication, low-power logic circuits, and quantum computing, etc. These technological advancements have not only promoted the expansion of application scenarios such as cross-scale integration and multi-physical field coupling but also demonstrated the broad application prospects and continuous development vitality of high-temperature superconducting electronics in the context of interdisciplinary integration.

high-temperature superconductor(s), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystals, terahertz emitter and detector, single-photon detection, superconducting diode, quantum bit

doi: [10.1360/CSB-2025-5461](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5461)