

基于聚焦氦离子束技术的高温超导 平面梯度计不平衡度*

王宇¹⁾²⁾³⁾ 王泉羽²⁾³⁾⁴⁾ 温光洪²⁾³⁾⁴⁾ 刘邵华²⁾³⁾⁴⁾ 崔书赫²⁾³⁾⁴⁾
辛瑞华²⁾³⁾⁶⁾ 王吉²⁾³⁾⁴⁾ 伍俊²⁾³⁾⁴⁾ 邱隆清²⁾³⁾⁴⁾
李浩^{1)2)3)4)†} 荣亮亮²⁾³⁾⁴⁾ 尤立星²⁾³⁾⁵⁾

1) (上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

2) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050)

3) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海市超导集成电路技术重点实验室, 上海 200050)

4) (中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049)

5) (中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049)

6) (上海大学微电子学院, 上海 201800)

(2026 年 2 月 14 日收到; 2026 年 4 月 2 日收到修改稿)

梯度计的不平衡度是制约其在无屏蔽环境下应用的关键指标, 聚焦氦离子束 (helium focused ion beam, He-FIB) 技术凭借纳米级加工精度, 为制备高温超导梯度计提供了新方案. 本文设计了高度对称的平面梯度计, 在结构上优化了不平衡度, 通过 He-FIB 技术制备的器件尺寸为 5 mm×10 mm、基线长度为 4.2 mm. 在 77 K 下梯度计的磁场梯度分辨率低至 1.48 pT·cm⁻¹·Hz^{-1/2}, 不平衡度优于 3×10⁻³, 与台阶结和双晶结等技术制备的高温超导梯度计性能相当, 验证了 He-FIB 技术在制备高平衡度高温超导梯度计的可行性, 为探索更高性能的高温超导梯度计提供了研究思路.

关键词: 聚焦氦离子束, 高温超导, 平面梯度计, 不平衡度

DOI: 10.7498/aps.75.20260253

CSTR: 32037.14.aps.75.20260253

1 引言

超导量子干涉器件 (SQUID) 是目前已知灵敏度最高的磁传感器之一, 在地球物理资源勘探、脑磁心磁等领域^[1-3]都具有重要的应用价值. 超导梯度计可以有效探测近场磁性源, 同时抵抗外界环境中没有梯度变化的远场磁性源带来的背景磁场噪声干扰^[4], 扩展了 SQUID 器件的应用范围. 超导

梯度计按结构可分为轴向梯度计和平面梯度计^[5,6], 相较于轴向梯度计, 平面梯度计因结构紧凑、方便集成等特点被广泛应用.

理想情况下梯度计只对磁场梯度敏感, 而对均匀磁场完全不响应. 但实际上由于制造工艺精度以及系统安装误差等因素, 梯度计对均匀磁场会产生一定的残余响应, 这个偏差通常由不平衡度这个指标来定量描述. 因此不平衡度是衡量梯度计抑制共模干扰能力的关键指标, 直接决定了其在复杂电磁

* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFF0720503)、中国科学院超导专项 (批准号: SCZX-0202)、中国科学院“率先行动”引才计划 (B 类)、国家自然科学基金 (批准号: 62201556) 和上海市科委科技基金 (批准号: 24DZ3000700) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: haoli@mail.sim.ac.cn

环境下的实用性[7].

近年来,国内外围绕降低不平衡度的研究主要集中在工艺优化和结构创新方向.例如在 SQUID 环路对称位置添加补偿环路[8],以及采用多层工艺,串联拾取线圈与 SQUID 相结合[9]等创新设计,通过优化器件本身的结构降低不平衡度.在 $5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的尺寸下,基于双晶结和台阶结等传统工艺制备的高温超导平面梯度计[9-17],磁场梯度分辨率介于 $0.15\text{--}2.5\text{ pT}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 之间,器件的不平衡度介于 $9.03\times 10^{-5}\text{--}1.1\times 10^{-2}$ 之间.

本文结合聚焦氦离子束 (He-FIB) 的制备工艺,设计并制备了 5 片几何上完美对称的高温超导平面梯度计,器件尺寸为 $5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,基线长度 (baseline) 为 4.2 mm ,并对器件电学特性、磁场梯度分辨率及不平衡度进行标定与分析. 77 K 下梯度计的磁场梯度分辨率可至 $1.48\text{--}1.71\text{ pT}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,不平衡度最低为 2.7×10^{-3} ,最高为 9.8×10^{-3} ,验证了 He-FIB 技术制备高温超导平面梯度计较高的一致性和成品率.

2 He-FIB 技术与器件制备

He-FIB 技术是一种无掩模、直写式纳米加工技术,其核心是向高正电压的低温针尖源引入氦气,氦原子电离后,带正电的氦离子随即被电场加速离开针尖,经电场透镜聚焦后形成纳米级离子束.通过精确控制氦离子剂量,可直接辐照出窄沟道,受辐照后钇钡铜氧 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) 材料转变为正常态金属或绝缘体,从而形成超导-正常态-超导 (SNS) 或超导-绝缘态-超导 (SIS) 约瑟夫森结[18,19],结的电学特性 (如临界电流、正常态电阻) 由氦离子辐照剂量精确控制[20].根据已有研究可知[21-23],He-FIB 技术已成功用于 YBCO 及 NbN 等超导材料的纳米级约瑟夫森结与 SQUID 器件直写制备,且表现出优异的电学性能和易集成特性,为高灵敏度磁传感器提供了可靠的技术路径,未来还可通过优化辐照参数、拓展材料体系,推动 He-FIB 技术在超导电子学中的广泛应用.

传统约瑟夫森结制备工艺主要有双晶结和台阶结两种[24],双晶结由于结的位置要固定在晶界所在的直线上,在几何上难以实现完美的对称性,只能通过增加补偿图案[8]或者额外串联约瑟夫森结[7]来提高磁通感应对称性,结的特性由薄膜生长

质量预先决定,无法灵活调控器件结构;而台阶结虽然在做结的位置规划上灵活度优于双晶结,但是结的特性十分依赖于台阶刻蚀的陡直度以及薄膜的外延质量,工艺控制难度高,器件的可重复性不理想.

相较于传统制备工艺,He-FIB 技术的灵活性和创新性在于可实现约瑟夫森结在平面任意位置的高自由度设计,无需传统工艺所需的特殊衬底或复杂多层刻蚀,可以设计出几何上完美对称的高温超导梯度计,并且可以通过氦离子辐照剂量的精确控制,写出可靠性和重复性都较高的约瑟夫森结,为制备高对称性的高温超导平面梯度计提供关键技术支撑.梯度计所用薄膜为铝酸镧 (LAO) 衬底的 50 nm 厚 YBCO 薄膜,超导转变温度 (T_c) 为 85 K ,制备是在单层薄膜上进行光刻显影等工艺步骤,最后通过 He-FIB 辐照 YBCO 制备出约瑟夫森结, He^+ 加速电压为 30 keV ,氦离子束剂量为 $3.6\times 10^{16}\text{ ions}/\text{cm}^2$.基于 He-FIB 技术,我们设计并制备了高对称结构的高温超导平面梯度计.图 1(a) 所示为 He-FIB 技术制备约瑟夫森结示意图,具体制备工艺见文献[25],通过双 SQUID 对称布局的结构提升器件对均匀磁场的抑制能力.图 1(b) 所示为制备的 5 片高温超导平面梯度计的实物图;图 1(c), (d) 分别为单个梯度计示意图以及 SQUID 区域的局部放大图.

3 实验方法

高温超导平面梯度计由 SQUID 和两个对称排列的拾取线圈组成,线圈结构通常是矩形或圆形,两线圈中心在空间上的距离被称为基线 b .当存在磁场梯度时,两线圈感生的差异磁通通过线圈耦合传输至 SQUID, SQUID 将磁通信号转换为电压信号输出,从而实现磁场梯度的检测.

梯度计标定实验场所为中国科学院上海微系统与信息技术研究所超导传感技术中心,标定流程如图 2(b) 所示.实验设备有信号发生器、功率放大器、动态信号分析仪、麦克斯韦线圈 (亥姆霍兹线圈)、读出电路等.不平衡度的标定是在地磁场大小为 $49.35\text{ }\mu\text{T}$ 的麦克斯韦线圈 (亥姆霍兹线圈) 中进行,电输运和噪声采集是在剩余磁场强度约为 10 nT 的坡莫合金磁屏蔽室内完成.

磁场梯度分辨率的标定是通过在标准梯度磁场中测量梯度计的梯度磁场-电压转换系数以及

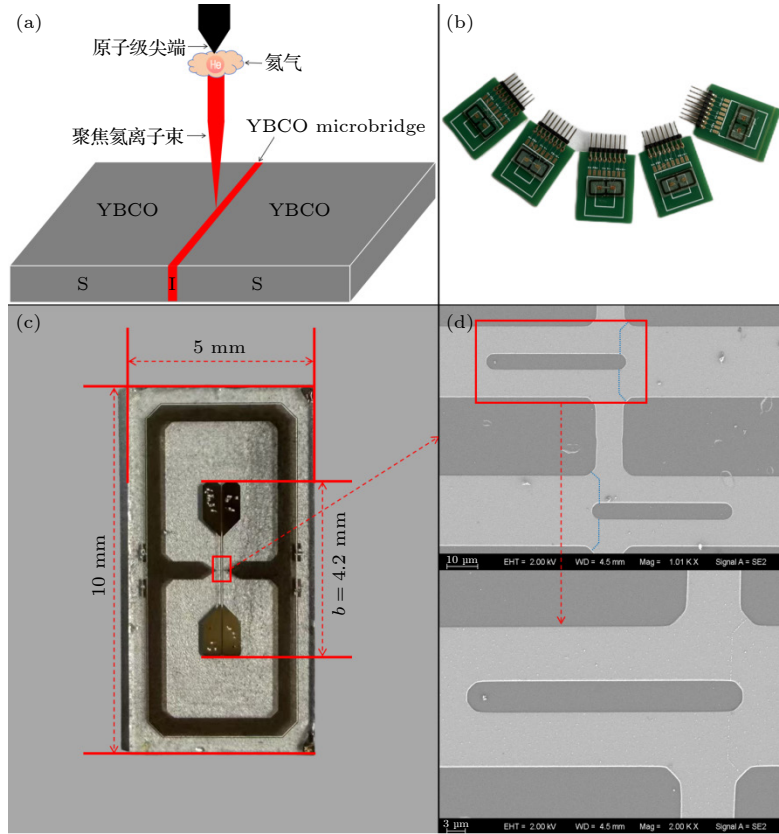


图 1 (a) He-FIB 技术制备约瑟夫森结示意图; (b) 高温超导平面梯度计实物图; (c) 单个梯度计示意图; (d) 梯度计局部放大图
Fig. 1. (a) Schematic of Josephson junction fabrication using He-FIB technology; (b) actual image of high-temperature superconducting planar gradiometer; (c) schematic of a single gradiometer; (d) localized enlargement of the gradiometer.

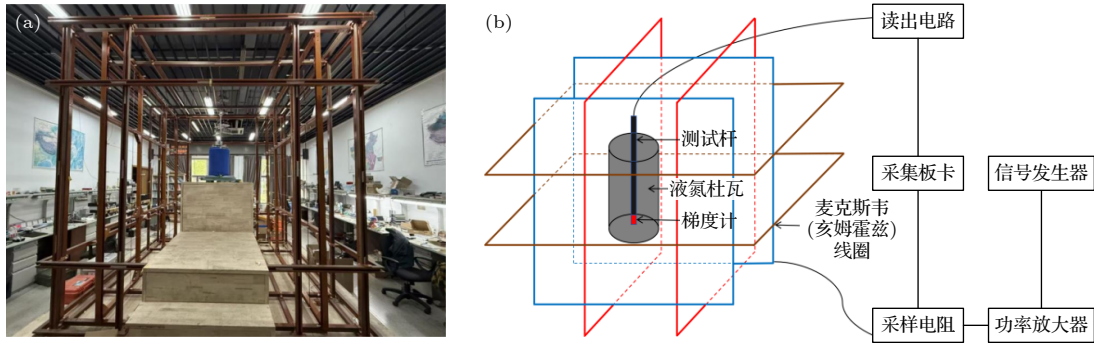


图 2 标定实验示意图 (a) 麦克斯韦 (亥姆霍兹) 线圈实物图; (b) 梯度计标定流程图

Fig. 2. Schematic diagram of calibration experiment: (a) Physical diagram of Maxwell (Helmholtz) coil; (b) gradiometer calibration flowchart.

磁通-电压转换系数, 并在屏蔽环境下, 记录其输出电压噪声谱密度, 结合系数换算后得到. 梯度计的磁场梯度分辨率 $S_G^{1/2}$ 决定了其能够分辨的最小磁场梯度:

$$S_G^{1/2} = S_\Phi^{1/2} / b \cdot A_{\text{eff}}^G, \quad (1)$$

$$A_{\text{eff}}^G = \Delta\Phi_S / (B_{yx} \cdot b), \quad (2)$$

式中, $S_\Phi^{1/2}$ 为磁通噪声谱密度; b 为梯度计的基线

长度; A_{eff}^G 为梯度计的有效梯度面积, 衡量梯度计对磁场梯度的敏感程度; $\Delta\Phi_S$ 为穿过梯度计两个拾取线圈磁通量的差; B_{yx} 为麦克斯韦线圈产生的磁场梯度值. 可以看出, 提高梯度计的磁场梯度分辨率可以通过增大基线长度和提高有效梯度面积来实现 [26].

不平衡度 Imbalance 定义为梯度计的有效寄生面积与有效梯度面积的比值. 不平衡度越低, 梯

度计的抗环境干扰能力越强. 不平衡度的标定是通过将梯度计置于标准的亥姆霍兹线圈和麦克斯韦线圈中, 计算其在均匀场下的有效寄生面积和在梯度场下的有效梯度面积, 代入 (3) 式计算得出, 计算公式如下 [8]:

$$\text{Imbalance} = A_{\text{eff}}/A_{\text{eff}}^{\text{G}}, \quad (3)$$

$$A_{\text{eff}} = \Delta\Phi_{\text{S}}/B_y, \quad (4)$$

式中, A_{eff} 为梯度计的有效寄生面积, 衡量梯度计对均匀磁场的敏感程度; B_y 为亥姆霍兹线圈施加的均匀磁场值.

4 结果与讨论

在液氮杜瓦中对多片 He-FIB 制备的高温超导平面梯度计进行电学性能表征, 图 3 为 G3 编号梯度计在液氮温度 77 K 进行的测试表征实验结果. 梯度计的 I - V 特性曲线如图 3(a) 所示, 临界电流 I_c 的大小为 102.2 μA . 图 3(b) 为不同偏置电流下梯度计的磁通-电压调制深度曲线, 偏置电流扫描范围为 115—125 μA , 扫描间隔 2 μA , 最大电

压调制深度 ΔV 为 11.47 μV , 对应的偏置电流为 117 μA . 图 3(c) 为不同磁场强度下的 I - V 特性曲线, 插图为在 10 μV 的判据下提取 I_c , 得到 I_c 随磁场强度变化的调制曲线, 由插图可知临界电流调制深度 ΔI_c 约为 10 μA , 相对调制深度约为 10%. 通过电磁软件仿真 [27] 得到 SQUID 环路电感约为 50 pH, 结区寄生电感约 15 pH, SQUID 总电感 L 约 65 pH, SQUID 电感参数定义为 $\beta_L = 2LI_c/\Phi_0$, 其中 I_c 为单个约瑟夫森结的临界电流, Φ_0 为磁通量子, 计算得到 $\beta_L \approx 3.2$. 根据数值计算 [28], 相对调制深度约为 20%, 实验测得的相对调制深度低于数值计算结果, 这一差异可能来自于过剩电流导致 I_c 被高估. 存在过剩电流的可能原因是薄膜表面存在与薄膜厚度 (50 nm) 相当的颗粒物阻挡了部分氦离子的辐照作用, 导致颗粒物下面的薄膜没有形成好的结势垒, 产生漏电通道. 另一方面, 提高临界电流的调制深度, 还可以通过减小 SQUID 环路电感, 使 β_L 值趋近于 1.

图 3(d) 为梯度计分别在 DC Bias 和 AC Bias 模式下锁定, 使用动态信号分析仪在屏蔽环境下采集电压噪声后, 根据电压-磁通转换系数计算得

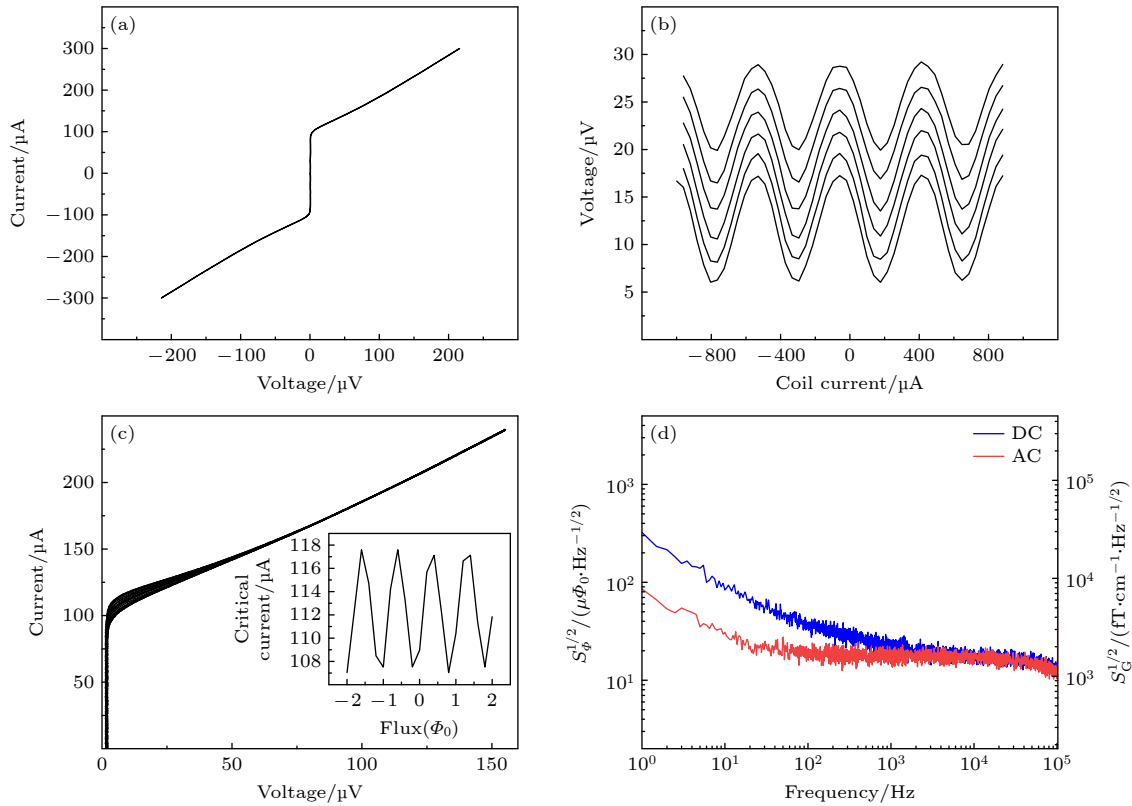


图 3 77 K 下高温超导平面梯度计的电学特性 (a) I - V 特性曲线; (b) V - Φ 特性曲线; (c) I_c - Φ 特性曲线; (d) 磁通及磁场噪声谱密度

Fig. 3. Electrical characteristics of a high-temperature superconducting planar gradiometer at 77 K: (a) I - V characteristic curve; (b) V - Φ characteristic curves; (c) I_c - Φ characteristic curves; (d) flux and magnetic field noise spectral density.

到器件的本征磁通噪声谱密度. 选取 10 kHz 处的磁通噪声为 $17.58 \mu\Phi_0 \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 代入 (1) 式和 (2) 式计算得出器件白噪声段的本征磁场梯度分辨率为 $1.6 \text{ pT} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 在 1 Hz 处器件的磁场梯度分辨率为 $7.79 \text{ pT} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 10 Hz 处为 $2.8 \text{ pT} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 高温超导器件的低频噪声的主要来源是临界电流的波动, 采用交流偏置反转技术周期性地高速反转 (102.4 kHz) 偏置电流方向, 临界电流波动产生的电压噪声在正负偏置电流时方向相反, 最终在时间域上平均, 二者会相互抵消, 可以看到 AC Bias 模式对低频噪声起到了抑制效果, 成功将 $1/f$ 噪声转折频率从约 3 kHz 降低至 20 Hz 左右.

图 4 为对 G3 梯度计进行不平衡度标定时, 亥姆霍兹线圈施加均匀磁场以及麦克斯韦线圈施加梯度磁场后, 线圈产生的磁场值以及对应的梯度计磁通响应输出. 实验中, 使用信号发生器施加一个正弦信号, 采集读出电路以及线圈采样电阻输出的电压峰峰值. 如图 4(a) 所示, 亥姆霍兹线圈垂直于梯度计施加的均匀磁场峰峰值 $B_y = 17.49 \mu\text{T}$, 以及梯度计的差分磁通输出 $\Delta\Phi_S = 3.44\Phi_0$, 代入 (4) 式计算

可得梯度计的有效寄生面积 $A_{\text{eff}} = 4.07 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$; 如图 4(b) 所示, 麦克斯韦线圈垂直于梯度计施加的磁场梯度峰峰值 $B_{yx} = 88.4 \text{ nT} \cdot \text{cm}^{-1}$, 以及梯度计的差分磁通输出 $\Delta\Phi_S = 0.97\Phi_0$, 代入 (2) 式计算可得梯度计的有效梯度面积 $A_{\text{eff}}^G = 0.054 \text{ mm}^2$. 将 A_{eff} 和 A_{eff}^G 的数据代入 (3) 式计算可得 G3 梯度计的不平衡度为 7.5×10^{-3} .

其余几片梯度计的临界电流、正常态电阻、电压调制深度、有效寄生面积、有效梯度面积、不平衡度以及磁场梯度分辨率的数据详见表 1. 临界电流 I_c 的范围为 22.4—144 μA , 正常态电阻 R_n 的范围为 0.83—1.71 Ω , 不同器件的 I_c 和 R_n 取值差异是受氦离子辐照剂量以及薄膜不均匀等因素影响; 梯度计的电压调制深度范围在 9.86—11.47 μV , 有效梯度面积 A_{eff}^G 保持在 0.049—0.059 mm^2 , 保持了良好的一致性, 验证了 He-FIB 技术制备高温超导平面梯度计的可靠性.

5 片梯度计不平衡度最低为 2.7×10^{-3} , 最高为 9.8×10^{-3} , 造成差异的原因可能是图案化器件制备以及器件装配精度导致; 磁场梯度分辨率 $S_G^{1/2}$ 稳

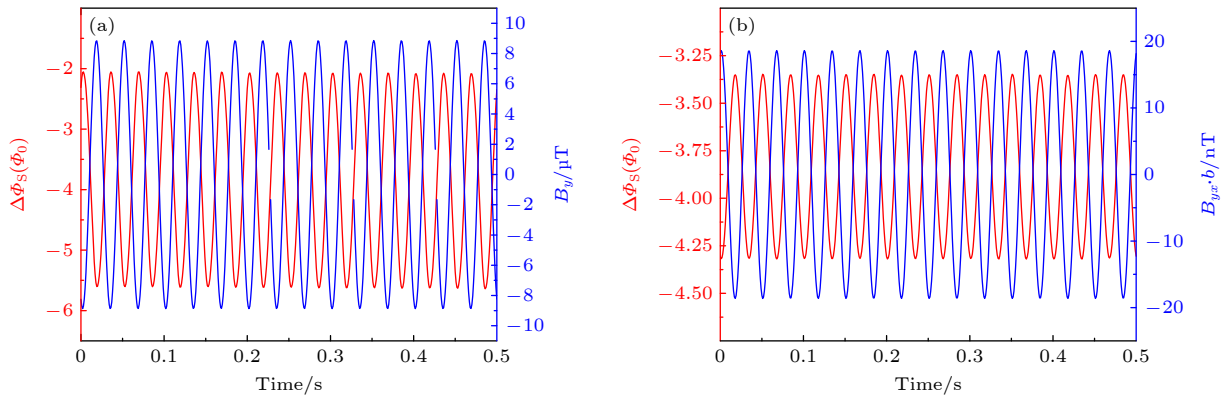


图 4 不平衡度的标定 (a) 梯度计对均匀磁场的差分磁通响应及对应的均匀磁场值; (b) 梯度计对梯度磁场的差分磁通响应及对应的梯度磁场值

Fig. 4. Calibration of imbalance: (a) The differential flux response of the gradiometer to a uniform magnetic field and the corresponding uniform magnetic field value; (b) the differential flux response of the gradiometer to a gradient magnetic field and the corresponding gradient magnetic field value.

表 1 高温超导平面梯度计电学特性表征数据

Table 1. Electrical characterization data for high-temperature superconducting planar gradiometer gauges.

SQUID	$I_c/\mu\text{A}$	R_n/Ω	$\Delta V/\mu\text{V}$	$A_{\text{eff}}/\text{mm}^2$	$A_{\text{eff}}^G/\text{mm}^2$	Imbalance	$S_G^{1/2}/(\text{pT} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$
G1	22.4	1.71	9.86	1.5×10^{-4}	5.4×10^{-2}	2.7×10^{-3}	1.67
G2	68	1.14	10.00	4.2×10^{-4}	5.8×10^{-2}	7.3×10^{-3}	1.48
G3	102.2	0.83	11.47	4.1×10^{-4}	5.4×10^{-2}	7.5×10^{-3}	1.60
G4	144	0.935	10.72	5.8×10^{-4}	5.9×10^{-2}	9.8×10^{-3}	1.57
G5	48	1.16	11.21	3.0×10^{-4}	4.9×10^{-2}	6.1×10^{-3}	1.71

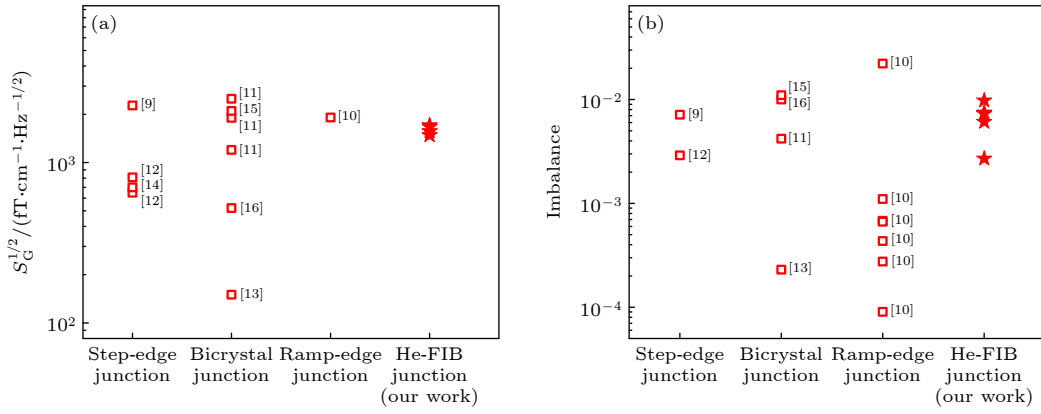


图 5 不同技术路线制备的器件性能对比 [9–16] (a) 磁场梯度分辨率对比; (b) 不平衡度对比

Fig. 5. Performance comparison of devices fabricated using different technological approaches by different research institutions [9–16]: (a) Magnetic field gradient resolution comparison; (b) imbalance comparison.

定在 $1.48\text{--}1.71 \text{ pT} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 文献 [9–16] 表明, 采用台阶结与双晶结等传统工艺制备的面积相同 ($5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) 的高温超导平面梯度计, 其磁场梯度分辨率的范围为 $0.15\text{--}2.5 \text{ pT} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 不平衡度介于 $9.03 \times 10^{-5}\text{--}1.1 \times 10^{-2}$ 之间. 由图 5 可知, 本研究采用聚焦氦离子束 (He-FIB) 技术制备的高温超导平面梯度计, 磁场梯度分辨率和不平衡度等性能处于合理的范围, 但与最优文献结果相比仍有提升空间. 一方面原因可能是器件的 $\beta_L \approx 3.2$, 偏离最优参数区间, 磁通-电压转换系数不够大, 室温端的前置放大器噪声占了主导; 另一方面的可能原因是薄膜不均匀导致的磁通蠕动, 引入了额外的磁通噪声.

本文是直接耦合的单层平面梯度计, 5 片梯度计的结构设计完全一致, 但是实验测得不平衡度的数据存在差别. 根据实验数据结果可以推测差别主要来自薄膜的不均匀性. 高温超导材料如钇钡铜氧 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) 属于陶瓷氧化物, 薄膜生长过程受多种因素影响容易出现不均匀 [29], 影响两个拾取线圈的对称性, 甚至产生磁通涡旋, 导致感受到的磁通不能完全抵消; 而低温超导材料如铌 (Nb) 是单质金属, 生长工艺成熟度高, 与多层膜的通孔工艺兼容, 两个拾取线圈能保持较高的对称性, 低温超导系统在移动平台中表现稳定, 主要原因是其较优的平衡度 [30].

相比于文献中报道的较优的平衡度, 本文有效梯度面积 (A_{eff}^G) 已达到同等水平, 不平衡度略高的根本原因在于有效寄生面积 (A_{eff}) 仍偏大. 想实现更优的平衡度, 一方面是采用多层工艺将 SQUID 本体做成梯度形式以降低其对均匀磁场的本征响

应 [9], 而本文制备的高温超导平面梯度计由于采用单层平面结构且缺少交叉通孔, SQUID 自身环路难以设计成梯度形式 [31], 这种结构的局限性使得器件不可避免地对均匀磁场保持敏感, 从而导致了不平衡度的升高; 另一方面则依赖集成磁强计及外部线圈进行主动补偿, 以消除均匀磁场的影响 [7]. 除去材料自身特性导致的拾取线圈不对称外, 未来可通过进一步优化器件的结构来有效降低梯度计的不平衡度.

5 结 论

本文采用 He-FIB 技术设计并制备了尺寸 $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、基线长度 4.2 mm 的高温超导平面梯度计, 器件的磁场梯度分辨率 $S_G^{1/2}$ 稳定在 $1.48\text{--}1.71 \text{ pT} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 不平衡度最低为 2.7×10^{-3} , 最高为 9.8×10^{-3} , 实验验证了 He-FIB 技术在提升器件对称性、降低不平衡度方面的有效性, 和其他器件制备工艺比较, 性能相当, 未来还可通过优化器件结构、串联 SQUID 等方式进一步提升性能. He-FIB 技术制备高温超导梯度计的高成品率, 可以满足高温超导全张量磁梯度探测技术的芯片需求, 为下一代地球物理勘探和量子磁导航等领域奠定技术基础.

特别感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所任衍允老师、朱毅和赵猛分别在梯度计测试, LabVIEW 测试程序和器件仿真方面提供的指导与帮助. 感谢软纳米平台 (SMN180827) 在聚焦氦离子束加工方面的帮助.

参考文献

- [1] Zheng T, Sun W J, Bin F, Lu Q L 2024 *Cryo. & Supercond.* **52** 22 (in Chinese) [郑婷, 孙文娟, 宾峰, 陆勤龙 2024 低温与超导 **52** 22]
- [2] Li J L, Zhang G F, Li S Y, Wang T J, Wei X Q, Li H, Gu Y D, Sun L M 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 198501 (in Chinese) [李加林, 张国峰, 李思瑶, 王甜琚, 魏雪齐, 李华, 古元冬, 孙立敏 2025 物理学报 **74** 198501]
- [3] Yang K, Zhao A, Zhang Y L, Zhang Q N, Zhang H W, Wang X, Rui D R, Huang D C, Kong X Y 2024 *IEEE Sens. J.* **24** 15986
- [4] Chen L, Jiang S Q, Xie X M 2008 *J. Funct. Mater. Devices.* **14** 971 (in Chinese) [陈亮, 蒋式勤, 谢晓明 2008 功能材料与器件学报 **14** 971]
- [5] Jeng J T, Lee H Y, Chen J C, Chen J H, Wu C H, Yang H C, Horng H E 2003 *J. Low Temp. Phys.* **131** 521
- [6] Anderson W H, Flynn E R, Karaulanov T, Matlashov A N, Nettles C, Radigan W 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 1600404
- [7] Chen K L, Yang H C, Ko P C, Horng H E 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064503
- [8] Kong X Y, Nakatani Y, Yutani A, Maki T, Itozaki H 2008 *Physica C* **468** 1946
- [9] Tsukamoto A, Adachi S, Hato T, Oshikubo Y, Tanabe K 2022 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **32** 1600309
- [10] Han B, Chen G H, Xu F Z, Zhao S P, Yang Q S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2051 (in Chinese) [韩冰, 陈赓华, 徐凤枝, 赵士平, 杨乾声 2000 物理学报 **49** 2051]
- [11] Wunderlich S, Schmidl F, Specht H, Dörrer L, Schneidewind H, Hübner U, Seidel P 1998 *Supercond. Sci. Technol.* **11** 315
- [12] Keenan S T, Young J A, Foley C P, Du J 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 025029
- [13] Schultze V, Drung D, IJsselsteijn R, Meyer H G 2004 *Supercond. Sci. Technol.* **17** S165
- [14] Seidel P, Zakosarenko V, Schmidl F, Dörrer L, Schneidewind H, Linzen S, Il'ichev E V, Darula M 1995 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** 2931
- [15] Öisjöen F, Magnelind P, Kalabukhov A, Winkler D 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 034004
- [16] Schultze V, Stolz R, IJsselsteijn R, Zakosarenko V, Fritzsche L, Thrum F, Il'ichev E, Meyer H G 1997 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** 3473
- [17] Stolz R, Schmelz M, Anders S, Kunert J, Franke D, Zakosarenko V 2020 *Supercond. Sci. Technol.* **33** 055002
- [18] Cybart S A, Cho E, Wong T J, Wehlin Björn H, Ma Meng K, Huynh Chuong, Dynes R C 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 598
- [19] Xiang B k, Wang Y H, Li H, Cybart S A 2024 *Electromagn. Sci.* **2** 0060131
- [20] Müller B, Karrer M, Limberger F, Becker M, Schröppel B, Burkhardt C J, Kleiner R, Goldobin E, Koelle D 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 044082
- [21] Li H, Cho E Y, Cai H, Wang Y T, McCoy S J, Cybart S A 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1600404
- [22] Li H, Cai H, Forman J, Cheng R, Hughes G, Walker H, Hamilton M C, Chen L, Zhang W J, You L X, Cybart S A 2023 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33** 1100904
- [23] Li H, Cai H, Sarkar N, LeFebvre J C, Cho E Y, Cybart S A 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 192603
- [24] Zheng D N 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 018502 (in Chinese) [郑东宁 2021 物理学报 **70** 018502]
- [25] Li H, Cai H, Cho E Y, McCoy S J, Wang Y T, LeFebvre J C, Zhou Y W, Cybart S A 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 070601
- [26] Schmidl F, Wunderlich S, Seidel P 2001 *High-T_c Superconductors and Related Materials*. ASHT 86 (Dordrecht: Springer) pp535–552
- [27] Fourie C J, Wetzstein O, Ortlepp T, Kunert J 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 125015
- [28] Clarke J, Braginski A I 2004 *The SQUID Handbook* (Vol. 1) (Weinheim: Wiley-VCH) pp46–50
- [29] Kuroki M, Horide T, Matsumoto K, Ishimaru M 2023 *J. Appl. Phys.* **134** 045302
- [30] Chwala A, Stolz R, Zakosarenko V, Fritzsche L, Schulz M, Rompel A, Polome L, Meyer M, Meyer H G 2012 *Proceedings of the 22nd ASEG Geophysical Conference and Exhibition* Brisbane, Australia, February 26–29, 2012 p1
- [31] Romans E J, Millar A J, Carr C, Palai R, Pegrum C M 2002 *Physica C* **372–376** 245

Imbalance of high-temperature superconducting planar gradiometers based on helium focused ion beam technology*

WANG Yu¹⁾²⁾³⁾ WANG Xiaoyu²⁾³⁾⁴⁾ WEN Guanghong²⁾³⁾⁴⁾ LIU Shaohua²⁾³⁾⁴⁾
 CUI Shuhe²⁾³⁾⁴⁾ XIN Ruihua²⁾³⁾⁶⁾ WANG Ji²⁾³⁾⁴⁾ WU Jun²⁾³⁾⁴⁾
 QIU Longqing²⁾³⁾⁴⁾ LI Hao^{1)2)3)4)†} RONG Liangliang²⁾³⁾⁴⁾ YOU Lixing²⁾³⁾⁵⁾

1) (*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

2) (*National Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

3) (*Shanghai Key Laboratory of Superconducting Integrated Circuit Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

4) (*School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

5) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

6) (*School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, China*)

(Received 14 February 2026; revised manuscript received 2 April 2026)

Abstract

The intrinsic imbalance of a superconducting quantum interference device (SQUID) gradiometer is a critical physical parameter that influences its common-mode rejection ratio (CMRR) and ultimate performance in unshielded environments. Traditional fabrication methods for high-temperature superconducting (HTS) Josephson junctions, such as bicrystal and step-edge techniques, suffer from strict substrate grain boundary constraints or poor etching reproducibility, making it difficult to precisely control the geometric symmetry and the electrical uniformity of the two pickup coils. To address this issue, this study explores a novel approach to optimize the imbalance of HTS planar gradiometers utilizing helium focused ion beam (He-FIB) technology.

Five highly symmetric HTS planar gradiometers are designed and fabricated on a single-layer YBCO thin film. He-FIB direct-write technology, featuring maskless and nanometer-level processing precision, is employed to precisely define the Josephson junctions via local irradiation-induced superconductor-normal metal-superconductor (SNS) transitions or superconductor-insulator-superconductor (SIS) transitions. The total footprint of the device is strictly limited to 5 mm×10 mm with a baseline length of 4.2 mm.

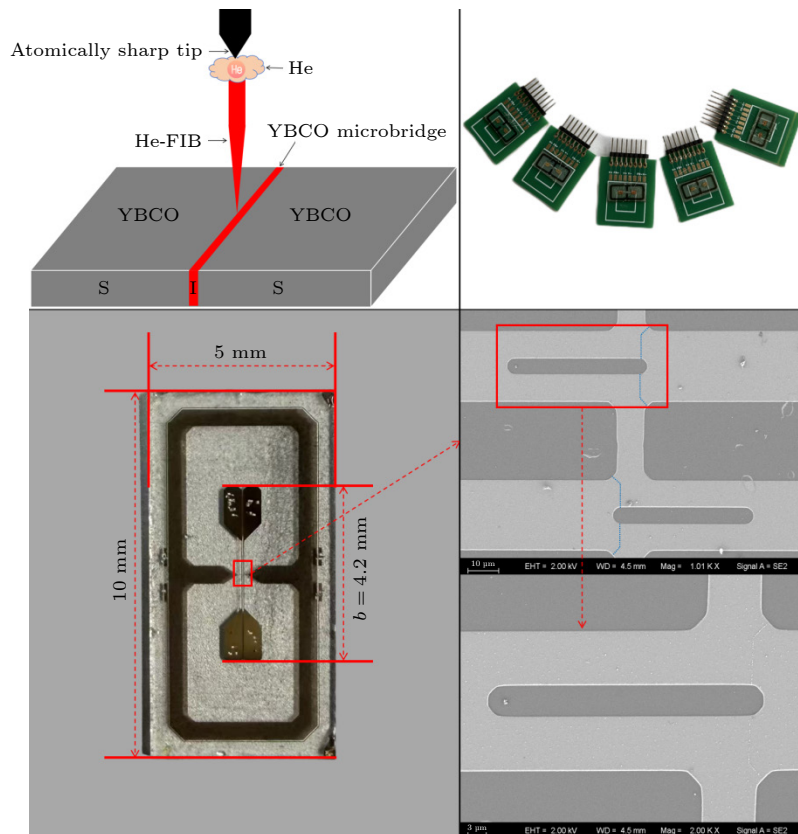
A systematic calibration experiment, utilizing homogeneous Helmholtz coils and gradient Maxwell coils, is established to evaluate the effective parasitic area and the effective gradient area. Extensive electrical and magnetic characterizations are performed at liquid nitrogen temperature 77 K. The fabricated devices exhibit high-quality resistively shunted junction (RSJ) model-like current-voltage characteristics, with critical currents (I_c) ranging from 22.4 to 144 μ A and voltage modulation depths of approximately 10 μ V. To further suppress the low-frequency $1/f$ noise originating from the intrinsic defect states in the He-FIB irradiated barriers, an alternating current (AC) bias reversal scheme is applied, successfully pushing the $1/f$ noise corner frequency down to approximately 20 Hz. In the white noise region (>1 kHz), the gradiometer achieves a magnetic field gradient resolution as low as 1.48 pT·cm⁻¹·Hz^{-1/2}. More importantly, the measured imbalance levels of the five prepared samples consistently fell within the narrow range of 2.7×10^{-3} to 9.8×10^{-3} .

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFF0720503), the Superconductivity Special Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. SCZX-0202), the “Take the Lead Initiative” Program (Category B) of Chinese Academy of Science, the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62201556), and the Shanghai Committee of Science and Technology, China (Grant No. 24DZ3000700).

† Corresponding author. E-mail: haoli@mail.sim.ac.cn

The experimental results demonstrate the superior reliability and high yield of the He-FIB technology in fabricating highly symmetric HTS planar gradiometers. Although the two-dimensional topology of the single-layer YBCO film limits the absolute imbalance to the 10^{-3} level due to the unavoidable parasitic area of the SQUID loop itself, the overall performance is comparable to, and in terms of yield surpasses, state-of-the-art devices fabricated by complex multilayer or bicrystal techniques.

Combined with software-based reference compensation, the achieved balance level and gradient resolution provide a solid technological foundation for next-generation unshielded magnetic detection applications, including deep-earth geophysical exploration and mobile magnetoencephalography.



Keywords: helium focused ion beam, high-temperature superconductivity, planar gradiometer, imbalance

DOI: [10.7498/aps.75.20260253](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260253)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260253](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20260253)

基于聚焦氦离子束技术的高温超导平面梯度计不平衡度

王宇 王泉羽 温光洪 刘邵华 崔书赫 辛瑞华 王吉 伍俊 邱隆清 李浩 荣亮亮 尤立星

Imbalance of high-temperature superconducting planar gradiometers based on helium focused ion beam technology

WANG Yu WANG Xiaoyu WEN Guanghong LIU Shaohua CUI Shuhe XIN Ruihua WANG Ji WU Jun QIU Longqing LI Hao RONG Liangliang YOU Lixing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 150707 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260253

CSTR: 32037.14.aps.75.20260253

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260253>

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

高温超导: 推动量子多体理论革命的引擎

High-temperature superconductivity: A driving force for the revolution in quantum many-body theory

物理学报. 2025, 74(7): 077403 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250313>

常压下双层结构镍氧化物薄膜高温超导电性的发现与研究展望

Ambient-pressure Ruddlesden-Popper bilayer nickelate superconductors: From discovery to prospects

物理学报. 2025, 74(9): 097401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250331>

铜氧化物超导体电荷序的共振X射线散射研究进展

Research progress of resonant X-ray scattering of charge order in cuprate superconductors

物理学报. 2025, 74(8): 087402 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241402>

三层镍氧化物高温超导研究进展

Research progress of high-temperature superconductivity in trilayer nickelate

物理学报. 2025, 74(22): 227402 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251258>

高温超导约瑟夫森结技术及应用于液氮温区量子电压标准的可能性

High-temperature superconducting Josephson junction technology and its potential application to quantum voltage standards in liquid nitrogen temperature range

物理学报. 2025, 74(9): 090304 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241262>

聚焦离子束加工的硅酸钇波导中铕离子的光学与超精细跃迁

Optical and hyperfine spectroscopic investigations on europium ions doped in yttrium orthosilicate waveguides fabricated by focused ion beam milling

物理学报. 2024, 73(22): 220303 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241070>