

二阶梯度交叉耦合超导量子干涉仪电流传感器研制

徐达 钟青 曹文会 王雪深 王仕建 李劲劲 刘建设 陈炜

A second-order gradiometric superconducting quantum interference device current sensor with cross-coupled structure

Xu Da Zhong Qing Cao Wen-Hui Wang Xue-Shen Wang Shi-Jian Li Jin-Jin Liu Jian-She Chen Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 128501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201816

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201816>

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

低噪声超导量子干涉器件磁强计设计与制备

Design and fabrication of low-noise superconducting quantum interference device magnetometer

物理学报. 2019, 68(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190483>

探测器对量子增强马赫-曾德尔干涉仪相位测量灵敏度的影响

Effect of detection efficiency on phase sensitivity in quantum-enhanced Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181193>

高灵敏度的量子迈克耳孙干涉仪

High sensitivity quantum Michelson interferometer

物理学报. 2018, 67(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172563>

基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器

Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect

物理学报. 2017, 66(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.094205>

多普勒差分干涉仪干涉图信噪比对相位不确定度研究

A propagation of interferogram signal-to-noise (SNR) and phase uncertainty in Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer

物理学报. 2020, 69(1): 014202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191179>

基于向日葵型圆形光子晶体的高灵敏度太赫兹折射率传感器

High sensitivity terahertz refractive index sensor based on sunflower-shaped circular photonic crystal

物理学报. 2019, 68(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191024>

二阶梯度交叉耦合超导量子干涉仪 电流传感器研制*

徐达¹⁾ 钟青^{1)†} 曹文会¹⁾ 王雪深¹⁾ 王仕建¹⁾
李劲劲^{1)‡} 刘建设²⁾ 陈炜²⁾

1) (中国计量科学研究院, 前沿计量科学中心, 北京 102200)

2) (清华大学, 微电子学研究所, 北京 100084)

(2020 年 10 月 31 日收到; 2021 年 2 月 5 日收到修改稿)

超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device, SQUID) 具有极低的噪声水平, 极高的磁场灵敏度和电流灵敏度, 可探测低噪声传感器的微弱电流信号. SQUID 电流传感器已成为超导转变边缘探测器 (transition-edge sensor, TES) 等低噪声探测信号读出的唯一选择. 本文研制了一种针对 TES 信号读出应用的二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器. 根据 TES 的信号读出需求, 设计了 SQUID 电流传感器的结构和各项参数. 其中, SQUID 环路、输入线圈和反馈线圈均采用二阶梯度结构. SQUID 环路与输入线圈、反馈线圈均采用不同平面交叉耦合方式, 可有效地减弱寄生电容. 通过优化工艺, 成功地研制出基于 Nb/Al-AlO_x/Nb 约瑟夫森结的二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器. 液氮温区测试结果显示, 输入线圈电流灵敏度为 $17 \mu\text{A}/\Phi_0$, 磁通白噪声为 $2 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, 电流白噪声为 $34 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. 在无磁屏蔽条件下的噪声测试结果显示, 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器具有良好的抵抗环境电磁干扰能力.

关键词: 超导量子干涉仪, 超导转变边缘探测器, 磁通噪声, 电流噪声, 电流灵敏度

PACS: 85.25.Dq

DOI: 10.7498/aps.70.20201816

1 引言

超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device, SQUID) 具有极高的探测灵敏度, 其等效能量分辨率接近量子极限, 是目前最灵敏的磁场传感器和电流传感器^[1,2]. 因此, SQUID 的应用非常广泛, 不仅作为磁场传感器, 用于地磁、心磁和脑磁等微弱磁场信号的探测, 还作为电流传感器, 用于超导转变边缘探测器 (transition-edge sensor, TES)、磁性金属微量能器等低噪声探

测器的微弱电流信号读出^[3,4]. 目前, SQUID 电流传感器已发展成为 TES 的微弱信号读出的唯一选择, 与 TES 一起成为天文探测、粒子物理以及辐射计量等大型科学装置的关键核心器件^[5-7]. 由于 TES 的噪声和阻抗很小, 与常用场效应晶体管放大器不匹配, 因此, 最初 TES 很少有实际应用. 在 2000 年前后, 美国国家标准技术研究院 (NIST) 研究人员使用 SQUID 电流传感器解决了这个问题^[1], 这是由于 SQUID 器件噪声很小, 而且阻抗与 TES 匹配. 随后, NIST 研究人员开始发展用于 TES 阵列读出的 SQUID 多种复用读出技术^[8]. 在 2010 年

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFF0206105)、国家自然科学基金 (批准号: 61701470, 20161361354) 和中国计量科学研究院 (批准号: AKY1946, AKYZD2012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhongq@nim.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: jinjinli@nim.ac.cn

之后, SQUID 的时分复用、码分复用和频分复用读出 TES 阵列技术逐渐成熟 [3], 同时, NIST 和海德堡大学又开始发展了微波复用 SQUID 读出技术 [9,10], 用于读出具有更多像素的 TES 阵列。

对于单个 TES 信号读出, 一般采用两级 SQUID 读出方案 [11], 其中, 第一级采用低噪声水平的单个 SQUID, 读取 TES 的微弱电流信号变化; 第二级采用 SQUID 阵列, 放大第一级 SQUID 的输出信号. 第一级 SQUID 通常与 TES 一起工作, 极易受到外界磁场的干扰, 因此, 需将第一级 SQUID 电流传感器设计成为梯度结构, 以减弱外界磁场的影响 [12]. 目前, SQUID 电流传感器的梯度结构主要有一阶梯度结构和二阶梯度结构 [8,11–16]. 其中, 一阶梯度 SQUID, 结构简单、设计灵活, 多用于 SQUID 阵列和高灵敏度的磁强计 [17]; 而用于 TES 信号读出的第一级 SQUID 多采用二阶梯度结构, 相比于一阶梯度 SQUID 结构, 可有效地提高抵抗电磁干扰的能力 [11,12]. 在 SQUID 器件中, SQUID 环路 with 输入线圈、反馈线圈的耦合方式主要有重叠耦合和交叉耦合两种方式. 这两种结构各有优缺点: 重叠耦合 SQUID 结构互感系数大, 但是存在较大寄生电容; 而交叉耦合 SQUID 结构寄生电容相对较小, 但是互感系数较小. 为了满足不同信号大小的 TES 读出需求, SQUID 器件的性能参数各不相同.

德国联邦物理研究院 (PTB) 发展了超高灵敏度的 SQUID 器件 [11,13,14,16,18,19], 研制的两级 SQUID 放大器中第一级 SQUID 为二阶梯度并联结构, 采用重叠耦合方式, 磁通噪声为 $1.2 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$. 美国 Star Cryoelectronics 公司可提供不同输入电感的 SQUID 产品 [20,21], SQUID 环路采用一阶梯度结构和重叠耦合方式, 磁通噪声为 $2.4\text{--}4 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$. 德国海德堡大学与德国 PTB 合作发展了二阶梯度 SQUID 电流传感器, SQUID 环路 with 输入线圈的互感为 162 pH, 其电流灵敏度为 $13 \mu\text{A}/\Phi_0$ [9,22,23]. 然而, 他们的器件中 SQUID 环路和输入线圈、反馈线圈采用重叠耦合方式, 这种耦合方式与交叉耦合方式相比会产生更大的寄生电容. 而且, 他们器件的 $1/4$ SQUID 环路采用正方形结构 [23], 与正八边形结构相比, 对称性较差, 对于环境磁场抵消不利. NIST 发展了用于 TES 阵列读出的多种 SQUID 复用读出技术, 其中, 时分复用 SQUID 电流传感器采用二阶梯度结构 [8,10,12,24]. 中国科学院上海微

系统与信息技术研究所发展了用于微弱磁场测试的 SQUID 磁强计, 采用一阶梯度结构和重叠耦合方式, 磁通噪声达到 $3\text{--}8 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ [17,25]. 但是国内用于 TES 信号读出的 SQUID 电流传感器仍然没有报道.

本文将介绍自主研制的基于 Nb/Al-AlO_x/Nb 约瑟夫森结的二阶梯度正八边形交叉耦合 SQUID 电流传感器, 测试并讨论了在液氦温区此 SQUID 电流传感器的性能, 包括磁通-电压调制曲线、电流灵敏度、磁通和电流噪声水平.

2 结构设计

用于 TES 信号读出 SQUID 电流传感器环路主要有两种平面梯度结构 [1,12,18,25–27]: 一阶梯度结构和二阶梯度结构, 如图 1 所示. 图 1(a) 为 SQUID 环路等效结构示意图, SQUID 环路是由两个约瑟夫森结连接组成的环路非梯度结构; 图 1(b) 为一阶梯度并联 SQUID 环路结构, 其中 SQUID 环路由两个线圈并联形成; 图 1(c) 为一阶梯度串联 SQUID 环路结构, 其中 SQUID 环路由两个线圈串联形成; 图 1(d) 为二阶梯度并联 SQUID 环路结构, 其中 SQUID 环路由四个线圈并联形成. 当外磁场变化时, 一阶梯度 SQUID 环路的两个线圈中产生的电流方向相反, 引起的 SQUID 电压输出相反, 从而有效地抵消垂直于 SQUID 平面的均匀磁场; 二阶梯度 SQUID 是将两个一阶梯度的结果再次差分, 不仅消除了垂直于 SQUID 平面的均匀磁场和线性变化磁场, 还可以消除垂直于

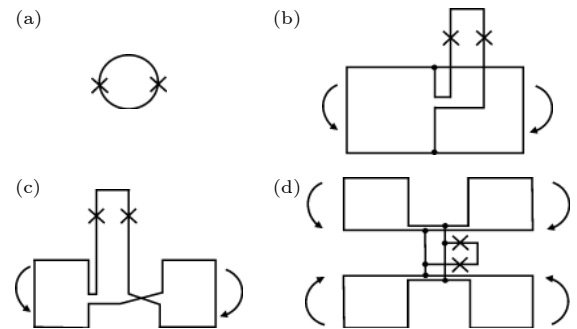


图 1 (a) SQUID 环路示意图; (b) 一阶梯度并联 SQUID 环路结构示意图; (c) 一阶梯度串联 SQUID 环路结构示意图; (d) 二阶梯度并联 SQUID 环路结构示意图

Fig. 1. Schematic diagrams of (a) SQUID loop, (b) a first-order gradiometric parallel SQUID loop, (c) a first-order gradiometric series SQUID loop, and (d) a second-order gradiometric parallel SQUID loop.

SQUID 平面磁场在 SQUID 平面内的不均匀分布变化.

参考文献 [23,24,28] 的 SQUID 器件参数, SQUID 输入电流灵敏度 $1/M_{\text{IN}}$ 设计为 $10\text{--}30\ \mu\text{A}/\Phi_0$, SQUID 环路与输入线圈的互感 M_{IN} 则为 $67\text{--}200\ \text{pH}$. 反馈电流灵敏度 $1/M_{\text{FB}}$ 设计为 $50\text{--}150\ \mu\text{A}/\Phi_0$, SQUID 环路与反馈线圈的互感 M_{FB} 则为 $13\text{--}40\ \text{pH}$.

依据此前研究经验 [29], 约瑟夫森结的临界电流密度 J_0 可以在 $1\text{--}1.5\ \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$ 间调控, 约瑟夫森结电容 $C_J = SC_s$ 约为 $2\ \text{pF}$, 其中 S 为约瑟夫森结面积, C_s 为单位面积约瑟夫森结电容. 当约瑟夫森结面积 S 为 $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ 时, 临界电流 I_0 为 $49\text{--}73\ \mu\text{A}$. 由于 SQUID 工作要求回滞系数 $\beta_c = 2\pi I_0 R_{\text{sh}}^2 C_J / \Phi_0$ 小于 1, 约瑟夫森结的并联电阻 R_{sh} 要小于 $1.5\ \Omega$. 根据 SQUID 的设计原则, 一般取调制系数 $\beta_L = 2I_0 L_{\text{SQ}} / \Phi_0$ 为 $1\text{--}2$ 之间最佳. 当 I_0 为 $49\text{--}73\ \mu\text{A}$ 时, SQUID 环路电感 L_{SQ} 选取为 $13\text{--}40\ \text{pH}$.

根据以上参数, 设计了用于 TES 信号读出的二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器, 其结构如图 2 所示, SQUID 环路 (SQ)、输入线圈 (IN)、反馈线圈 (FB) 均采用二阶梯度结构. SQUID 环路与输入线圈、反馈线圈均采用不同平面交叉耦合方式, 其等效电路图如图 3 所示.

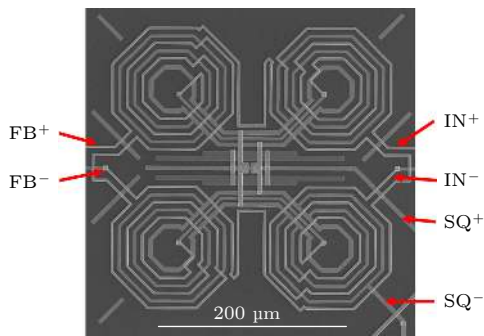


图 2 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器扫描电子显微镜图

Fig. 2. Scanning electron microscope picture of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor.

SQUID 环路由四个正八边形槽垫圈并联组成, 其中每个槽垫圈由三个正八边形并联组成, 边长分别为 $17\ \mu\text{m}$, $33\ \mu\text{m}$ 和 $45\ \mu\text{m}$. 输入线圈和反馈线圈分别与每个正八边形槽垫圈有 2.5 匝和

0.5 匝的耦合区域, 线圈的绕向极性与 SQUID 环路相匹配. 两个约瑟夫森结在 SQUID 环路中间, 每个约瑟夫森结有两个 $10\ \mu\text{m}$ 宽, $3\ \mu\text{m}$ 长的并联电阻, 按照方块电阻值为 $5.6\ \Omega/\square$, 有效并联电阻为 $0.84\ \Omega$. 回滞系数 β_c 的设计值为 0.2 , 确保在 mK 温区实现小的噪声参数, 同时也可保证约瑟夫森结发生变化时 SQUID 仍可以稳定运行. 为了减小热电子效应, 约瑟夫森结并联电阻与散热片相连.

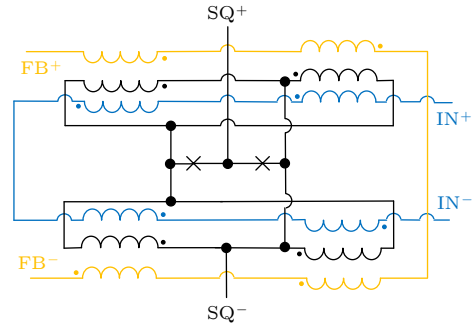


图 3 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器等效电路图

Fig. 3. Equivalent circuit of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor.

这种并联电感的设计可以增大 SQUID 环路与输入线圈、反馈线圈的耦合面积, 从而提高两者之间的磁通耦合系数, 同时减小了 SQUID 环路电感, 增强 SQUID 电流传感器的抗干扰能力. 根据 SQUID 原理 [1], SQUID 的磁通噪声 $S_\Phi \approx 16k_B TL^2/R$, 磁通电压转换系数 $V_\Phi \approx 1/(\pi LC)^{1/2}$, 噪声能量 $\varepsilon \approx 16k_B T(LC)^{1/2}$. 由此可知, 二阶梯度 SQUID 环路中四个槽垫圈并联, 减小了 SQUID 环路电感, 使得 SQUID 的磁通-电压转换系数增大, 磁通噪声和噪声能量减小.

通过对二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的各个部分电感和互感进行仿真计算 [30], 得到 SQUID 环路电感 L_{SQ} 为 $33\ \text{pH}$, 输入线圈电感 L_{IN} 为 $3\ \text{nH}$, 反馈线圈电感 L_{FB} 为 $1\ \text{nH}$, SQUID 环路与输入线圈互感 $M_{\text{IN}} = k_{\text{IN}}(L_{\text{SQ}}L_{\text{IN}})^{1/2}$ 为 $130\ \text{pH}$, SQUID 环路与反馈线圈互感 $M_{\text{FB}} = k_{\text{FB}}(L_{\text{SQ}}L_{\text{FB}})^{1/2}$ 为 $36\ \text{pH}$. 因此, 设计的 SQUID 电流传感器的输入电流灵敏度 $1/M_{\text{IN}}$ 为 $15\ \mu\text{A}/\Phi_0$, 反馈电流灵敏度 $1/M_{\text{FB}}$ 为 $56\ \mu\text{A}/\Phi_0$. 表 1 总结了二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的设计参数.

表 1 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的设计参数

Table 1. Design parameters of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor.

参数	设计值
约瑟夫森结尺寸 $S/(\mu\text{m} \times \mu\text{m})$	7×7
约瑟夫森结临界电流 $I_0/\mu\text{A}$	49
约瑟夫森结电容 C_J/pF	2
并联电阻 R_{sh}/Ω	0.84
回滞系数 β_c	0.2
调制系数 β_L	1.6
SQUID 环路电感 L_{SQ}/pH	33
SQUID 环路与输入线圈互感 M_{IN}/pH	130
SQUID 环路与反馈线圈互感 M_{FB}/pH	36
输入线圈电感 L_{IN}/nH	3
反馈线圈电感 L_{FB}/nH	1
输入电流灵敏度 $1/M_{\text{IN}}/(\mu\text{A} \cdot \Phi_0^{-1})$	15
反馈电流灵敏度 $1/M_{\text{FB}}/(\mu\text{A} \cdot \Phi_0^{-1})$	56

3 器件制备

在有 SiO_2 绝缘层的单晶硅片衬底上, 采用直流磁控溅射生长 Nb/Al- AlO_x /Nb 三层膜. Nb/Al- AlO_x /Nb 三层膜沉积的背景真空优于 5×10^{-8} Torr ($1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$). 底层 Nb 电极和上层 Nb 电极的厚度分别为 200 和 120 nm, Al- AlO_x 的厚度为 12 nm. Al 膜在不破坏真空的条件下, 使用高纯氧气氧化. 通过控制氧化压强和氧化时间来控制 AlO_x 势垒层的厚度, 从而调控约瑟夫森结临界电流密度. 在气压为 0.5 Torr 的氧气中氧化 15 h. 在生长 Nb/Al- AlO_x /Nb 三层膜后, 对 Nb/Al- AlO_x /Nb 三层膜进行光刻和刻蚀工艺: 采用反应离子刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 在 SF_6 气体中对上层和下层 Nb 膜进行图形化, 定义约瑟夫森结区和底电极图形; 采用湿法腐蚀对 Al- AlO_x 势垒层进行图形化, Al- AlO_x 势垒层面积大于约瑟夫森结区的上层 Nb 膜面积, 避免了约瑟夫森结区不可控制地侧向腐蚀. 之后, 使用等离子增强化学气相沉积系统 (ICP-CVD) 生长 350 nm SiO_2 绝缘层, 并通过 ICP-RIE 刻蚀技术在 CHF_3 和 O_2 的混合气体中定义通孔结构. 采用电子束蒸发制备钯金 (PdAu) 电阻层, 并采用剥离的方式形成结构. PdAu 的厚度为 100 nm, 方块电阻值为 $5.6 \Omega/\square$. 最后, 采用直流磁控溅射法生长

400 nm 厚的 Nb 线层, 通过 RIE 法在 SF_6 气体中刻蚀得到输入线圈、反馈线圈, 并实现结与电阻的连接. 最终制备出二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器, 其扫描电子显微镜图像如图 2 所示.

4 性能测试和讨论

SQUID 电流传感器工作时需要低温环境和良好的磁屏蔽环境. 利用铝合金液氮杜瓦提供液氮温区工作环境. 采用坡莫合金屏蔽筒内置铅超导屏蔽筒来提供良好的磁屏蔽. 使用低温胶将制备的二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器芯片固定到样品托上, 并通过 PCB 板接线到 SQUID 电子学系统, 最后将装有 SQUID 器件的样品杆置于液氮杜瓦中进行低温性能测试. SQUID 电流传感器的 I - V 曲线通过传统的四电极法测试得到, 使用乐真 F2002 程控精密电流源输入电流, 安捷伦 34420A 电压表读取电压. 使用 Magnicon GmbH 公司的低噪声、高增益 SQUID 电子学系统 XXF-1^[31] 测试 V - Φ 特性曲线. 该 SQUID 电子学系统电压噪声极低, 可实现低噪声 SQUID 电流传感器的磁通锁定工作. 将 SQUID 器件磁通锁定在 $1/4\Phi_0$ 处后, 采用动态信号分析仪 HP35670A 测试 SQUID 器件的噪声曲线.

图 4 显示的是在不同温度下二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的电流-电压 (I - V) 曲线. 从图 4 可知, 该器件是非回滞的, 临界电流 I_c 在 4.2—7.7 K 下为 168—57 μA , 随着温度的升高, 器件的临界电流逐渐降低. 根据此 I - V 曲线正常态的斜

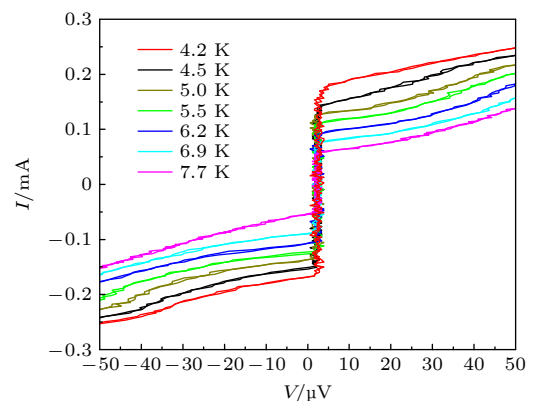


图 4 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的电流-电压曲线

Fig. 4. Current-voltage curves of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor.

率, 得到约瑟夫森结的并联电阻 R_{sh} 为 1Ω .

图 5 显示了二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器输入线圈的电压-磁通 ($V-\Phi$) 调制曲线. 设置输入线圈的电流从 0 增大到 $100 \mu\text{A}$ 时, 呈现约 5.8 个周期. 输入线圈的电流灵敏度 $1/M_{\text{IN}}$ 为 $17 \mu\text{A}/\Phi_0$, SQUID 环路与输入线圈的互感 M_{IN} 为 117 pH . 这与表 1 中输入电流灵敏度 $1/M_{\text{IN}}$ 设计值 $15 \mu\text{A}/\Phi_0$ 和 SQUID 环路与输入线圈的互感仿真结果 130 pH 相一致.

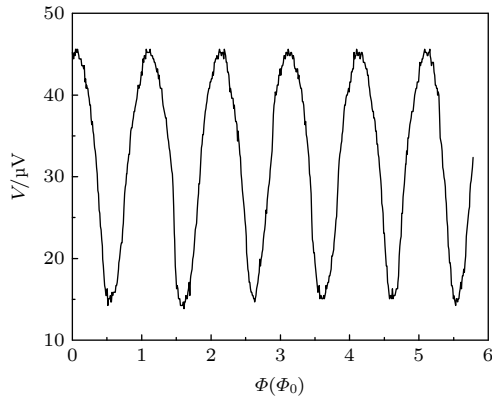


图 5 二阶梯度交叉耦合 SQUID 输入线圈的电压-磁通调制曲线

Fig. 5. Voltage-flux curve for the input coil of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID.

图 6 显示的是二阶梯度交叉耦合 SQUID 器件的反馈线圈的电压-磁通 ($V-\Phi$) 调制曲线. $V-\Phi$ 调制曲线的峰峰值最大为 $31 \mu\text{V}$, 磁通-电压转换系数为 $108 \mu\text{V}/\Phi_0$. 使用具有良好磁屏蔽效果的坡莫合金和铅屏蔽罩时, 二阶梯度交叉耦合 SQUID 器件在 4.2 K 工作时 $V-\Phi$ 调制曲线的调制深度最大时对应的偏置电流 $I_{\text{b,max}}$ 为 $215 \mu\text{A}$. 根据公式 $I_0 \approx I_{\text{b,max}}/2 + k_B T \left(1 + \sqrt{1 + I_{\text{b,max}} \Phi_0 / k_B T} \right) / \Phi_0$ [32], $I_{\text{b,max}}$ 为 $V-\Phi$ 调制曲线峰峰值最大时 SQUID 器件的偏置电流, 估算 SQUID 器件中约瑟夫森结的临界电流 I_0 为 $110 \mu\text{A}$. 回滞系数 $\beta_c = 2\pi I_0 R_{\text{sh}}^2 C_J / \Phi_0$ 为 0.67 , SQUID 器件中的约瑟夫森结为过阻尼结. 而使用具有没有磁屏蔽效果的不锈钢罩时, SQUID 器件的 $I_{\text{b,max}}$ 为 $218 \mu\text{A}$. 因此, 在不同屏蔽环境下 SQUID 器件的 $I_{\text{b,max}}$ 变化不大, 也说明 SQUID 器件的临界电流受热噪声和外界磁场的影响不大.

设置反馈线圈的电流从 0 增加到 $250 \mu\text{A}$ 时, 反馈线圈 $V-\Phi$ 曲线呈现约 2.9 个周期. 反馈线圈的

电流灵敏度 $1/M_{\text{FB}}$ 为 $86 \mu\text{A}/\Phi_0$, SQUID 环路与反馈线圈的互感 M_{FB} 为 24 pH . 这与表 1 中反馈电流灵敏度 $1/M_{\text{FB}}$ 设计值 $56 \mu\text{A}/\Phi_0$ 和 SQUID 环路与反馈线圈的互感仿真结果 36 pH 相接近.

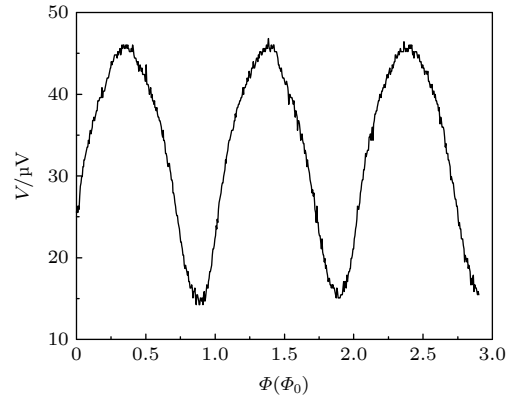


图 6 二阶梯度交叉耦合 SQUID 反馈线圈的电压-磁通调制曲线

Fig. 6. Voltage-flux curve for the feedback coil of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID.

为了评估二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的抗环境干扰能力, 对比测试具有良好磁屏蔽的坡莫合金/铅屏蔽筒和没有磁屏蔽效果的不锈钢套筒下的噪声水平. 将 SQUID 电流传感器的工作点磁通锁定在图 6 中 $V-\Phi$ 曲线的 $1/4 \Phi_0$ 处, 测试结果如图 7 所示. 为了避免 SQUID 电子学中前置放大器的噪声的影响, 通过磁通锁定环的反馈电路计算了该器件的磁通噪声曲线, 电压白噪声 $\sqrt{S_V}$ 为 $1.7 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 反馈电路中反馈电阻 R_f 为 $10 \text{ k}\Omega$, 其磁通白噪声 $\sqrt{S_\Phi} = (\sqrt{S_V}/R_f) M_{\text{FB}}$ 为 $2 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, 电流白噪声 $\sqrt{S_I} = \sqrt{S_\Phi}/M_{\text{IN}}$ 为 $34 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, $1/f$ 拐点频率约为 200 Hz , 可满足部分 TES 对 SQUID 电流传感器的噪声要求 [10]. 从图 7 可以看出, 当频率 $f < 20 \text{ Hz}$ 时, 在无磁屏蔽条件下测试二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器得到的噪声水平比在良好磁屏蔽条件下测试得到的噪声大. 在 0.1 Hz 处, 无磁屏蔽条件下比良好磁屏蔽条件下测试得到的噪声水平增大了三个量级. 而在低频下, 非梯度 SQUID 器件在无磁屏蔽下比良好磁屏蔽下的噪声水平增大了三个量级 [18]. 当频率 $f > 20 \text{ Hz}$ 时, 无磁屏蔽条件下和良好磁屏蔽条件下测试得到的噪声水平相当. 这说明该二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器可在无磁屏蔽环境下工作, 具有良好的抵抗环境电磁干扰能力.

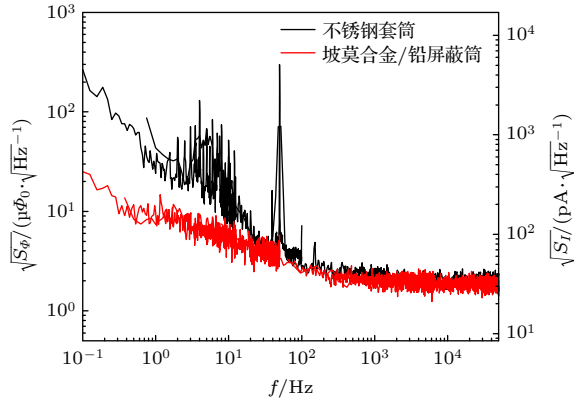


图7 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的噪声曲线

Fig. 7. Noise curves of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor.

$1/f$ 噪声主要来自约瑟夫森结的临界电流涨落和 SQUID 器件中捕获磁通线的运动^[1]. $1/f$ 噪声拐点频率较高可能与约瑟夫森结的尺寸、临界电流和 SQUID 梯度结构捕获磁通的能力有关. 减小约瑟夫森结尺寸, 降低临界电流, 可抑制临界电流涨落, 同时, 减小约瑟夫森结尺寸, 可减弱对磁场线的捕获能力.

二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的液氮温区相关的测试结果总结在表 2. 由表 2 可以看出, 研制的二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器可以初步用于 TES 的信号读出, 电流分辨率达到 $34 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. 进一步优化输入线圈匝数和 SQUID 环路大小, 提高 SQUID 环路 with 输入线圈之间的互感, 可以提高二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感

表 2 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器的性能参数

Table 2. Property parameters of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor.

参数	实测值
偏置电流 $I_{b, \max}/\mu\text{A}$	215
并联电阻 R_{sh}/Ω	1
回滞系数 β_c	0.67
输入电流灵敏度 $1/M_{\text{IN}}/(\mu\text{A}\cdot\Phi_0^{-1})$	17
反馈电流灵敏度 $1/M_{\text{FB}}/(\mu\text{A}\cdot\Phi_0^{-1})$	86
磁通-电压转换系数 $V_{\Phi}/(\mu\text{V}\cdot\Phi_0^{-1})$	108
最大调制峰值 $V_{\text{pp}}/\mu\text{V}$	31
磁通白噪声 $\sqrt{S_{\Phi}}/(\mu\Phi_0\cdot\sqrt{\text{Hz}}^{-1})$	2
电流白噪声 $\sqrt{S_I}/(\text{pA}\cdot\sqrt{\text{Hz}}^{-1})$	34
SQUID 环路 with 输入线圈互感 M_{IN}/pH	117
SQUID 环路 with 反馈线圈互感 M_{FB}/pH	24

器的输入电流灵敏度, 从而降低电流噪声水平; 进一步减小约瑟夫森结尺寸, 降低临界电流, 降低 $1/f$ 拐点频率, 满足更微弱、更低频信号变化的 TES 探测要求.

5 结 论

本文研制了基于 Nb/Al-AlO_x/Nb 约瑟夫森结的二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器, 其中 SQUID 环路、输入线圈和反馈线圈都是二阶梯度结构, SQUID 与输入线圈、反馈线圈采用不同平面交叉耦合方式, 实现了器件的输入电流灵敏度达到 $17 \mu\text{A}/\Phi_0$, 磁通白噪声达到 $2 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, 电流白噪声达到 $34 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. 二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器具有良好的抵抗环境电磁干扰能力. 未来将进一步优化二阶梯度交叉耦合 SQUID 电流传感器中 SQUID 环路 with 输入线圈的互感, 优化约瑟夫森结尺寸和临界电流, 从而提高器件的电流灵敏度, 降低电流噪声水平, 降低 $1/f$ 拐点频率, 满足更微弱电流信号变化的、更低频下 TES 应用的需求.

感谢中国计量科学研究院杨雁、张明宇和倪泽刚的讨论和帮忙.

参考文献

- [1] Clarke J, Braginski A I 2004 *The SQUID Handbook* (Vol. 1) (KgaA, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.) pp1–210
- [2] Granata C, Vettoliere A, Russo R, Fretto M, de Leo N, Lacquaniti V 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 102602
- [3] Ullom J N, Bennett D A 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 084003
- [4] Jackson B D, Korte P A J, Kuur J, Mauskopf P D, Beyer J, Bruijn M P, Cros A, Gao J R, Griffin D, Hartog R, Kiviranta M, Lange G, Leeuwen B J, Macculi C, Ravera L, Trappe N, Weers H, Withington S 2012 *IEEE Trans. Terahertz Sci. and Technol.* **2** 12
- [5] Henderson S W, Ahmed Z, Austermann J, Becker D, Bennett D A, Brown D, Chaudhuri S, Cho H M S, D'Ewart J M, Dober B, Duff S M, Dusatko J E, Fatigoni S, Frisch J C, Gard J D, Halpern M, Hilton G C, Hubmayr J, Irwin K D, Karpel E D, Kernasovskiy S S, Kuenstner S E, Kuo C L, Li D, Mates J A B, Reintsema C D, Smith S R, Ullom J, Vale L R, Winkle D D V, Vissers M, Yu C 2018 *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX* Texas, United States, June 10–15 2018 p1070819
- [6] Cui W, Chen L B, Gao B, Guo F L, Jin H, Wang G L, Wang J J, Wang W, Wang Z S, Wang Z, Yuan F, Zhang W 2020 *J. Low Temp. Phys.* **199** 502

- [7] Schmidt M, Helversen M, López M, Gericke F, Schlottmann E, Heindel T, Kück S, Reitzenstein S, Beyer J 2018 *J. Low Temp. Phys.* **193** 1243
- [8] Irwin K D 2002 *Physica C* **368** 203
- [9] Kempf S, Wegner M, Fleischmann A, Gastaldo L, Herrmann F, Papst M, Richter D, Enss C 2017 *AIP Adv.* **7** 015007
- [10] Bennett D A, Mates J A B, Gard J D, Hoover A S, Rabin M W, Reintsema C D, Schmidt D R, Vale L R, Ullom J N 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 2101405
- [11] Drung D, Abmann C, Beyer J, Kirste A, Peters M, Ruede F, Schurig T 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 699
- [12] Stiehl G M, Cho H M, Hilton G C, Irwin K D, Mates J A B, Reintsema C D, Zink B L 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 298
- [13] Beyer J, Drung D 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 095012
- [14] Schurig T 2014 *J. Phys. Conf. Ser.* **568** 032015
- [15] Silva-Feaver M, Arnold K, Barron D, Denison E V, Dobbs M, Groh J, Hilton G, Hubmayr J, Irwin K, Lee A, Vale L R 2018 *J. Low Temp. Phys.* **193** 600
- [16] Schurig T, Trahms L 2009 *IEEE CSC & ESAS European Superconductivity News Forum* **3** RN9
- [17] Han H X, Zhang G F, Zhang X, Liang T T, Ying L L, Wang Y L, Peng W, Wang Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 138501 (in Chinese) [韩昊轩, 张国峰, 张雪, 梁恬恬, 应利良, 王永良, 彭炜, 王镇 2019 物理学报 **68** 138501]
- [18] Drung D 2016 *IEEE CSC & ESAS European Superconductivity News Forum* **10** CR70
- [19] SQUID sensors, Magnicon GmbH www.magnicon.com [2021-02-07]
- [20] LTS Sensors, STAR Cryoelectronics www.starcryo.com [2021-02-07]
- [21] Cantor R, Hall J A, Matlachov A N, Volegov P L 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 672
- [22] Kempf S, Ferring A, Fleischmann A, Gastaldo L, Enss C, 2013 *Supercond. Sci. Technol.* **26** 065012
- [23] Kempf S, Ferring A, Fleischmann A, Enss C 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 045008
- [24] Doriese W B, Morgan K M, Bennett D A, Denison E V, Fitzgerald C P, Fowler J W, Gard J D, Hays-Wehle J P, Hilton G C, Irwin K D, Joe Y I, Mates J A B, O'Neil G C, Reintsema C D, Robbins N O, Schmidt D R, Swetz D S, Tatsuno H, Vale L R, Ullom J N 2016 *J. Low Temp Phys* **184** 389
- [25] Zhang X, Zhang G, Wang Y, Rong L, Zhang S, Wu J, Qiu L, Xie X, Wang Z 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1600503
- [26] Kuriki S, Isobe Y, Mizutani Y 1987 *J. Appl. Phys.* **61** 781
- [27] Carelli P, Chiaventi L, Leoni R, Pullano M, Spagnolo G S 1991 *Clin. Phys. Physiol. Meas.* **12** 13
- [28] Beyer J, Drung D, Peters M, Schurig T, Bandler S R 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 505
- [29] Xu D, Li J, Cao W, Liu J, Chen W 2020 *Conference on Precision Electromagnetic Measurements* Denver, United States, August 24–28 2020 p9191689
- [30] Fourie C J, Perold W J 2005 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 300
- [31] Drung D, Hinnrichs C, Barthelmeß H 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** S235
- [32] Drung D, Ludwig F, Müller W, Steinhoff U, Trahms L, Koch H, Shen Y Q, Jensen M B, Vase P, Holst T, Freltoft T, Curio G 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1421

A second-order gradiometric superconducting quantum interference device current sensor with cross-coupled structure^{*}

Xu Da¹⁾ Zhong Qing^{1)†} Cao Wen-Hui¹⁾ Wang Xue-Shen¹⁾
Wang Shi-Jian¹⁾ Li Jin-Jin^{1)‡} Liu Jian-She²⁾ Chen Wei²⁾

1) (*Center for Advanced Measurement Science, National Institute of Metrology, Beijing 102200, China*)

2) (*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 31 October 2020; revised manuscript received 5 February 2021)

Abstract

Superconducting quantum interference device (SQUID) has extremely high magnetic field sensitivity, current sensitivity, and can detect a low-noise weak current signal. The SQUID current sensor has become the only option of the readout of low-noise detector, such as transition-edge sensor (TES). In this paper, a second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor for TES application is developed. According to the requirements for TES detectors, the structure and various parameters of SQUID current sensor are designed. The SQUID loop, input coil and feedback coil of the SQUID current sensor all use the second-order gradiometric structure. All the couple ways between SQUID loop and input coil or feedback coil adopt cross-coupling mode in different planes, which can effectively weaken the parasitic capacitance. A second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor based on Nb/Al-AlO_x/Nb Josephson junction is successfully fabricated on a silicon wafer by optimizing the process. The properties of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor are measured at liquid helium temperature. The bias current of SQUID is 215 μA when the modulation depth of $V-\Phi$ modulation curve is maximum. The maximum modulation peak of SQUID is 31 μV . The flux-to-voltage transfer coefficient of SQUID is 108 $\mu\text{V}/\Phi_0$. The input coil current sensitivity is 17 $\mu\text{A}/\Phi_0$, the mutual inductance between SQUID loop and input coil is 117 pH. The current sensitivity of feedback coil is 86 $\mu\text{A}/\Phi_0$, the mutual inductance between SQUID loop and feedback coil is 23 pH. The second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor has a white flux noise of 2 $\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ and a white current noise of 34 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ with 1/ f corner frequency around 200 Hz. The result of noise level under the condition without magnetic shielding shows that the SQUID current sensor with second-order gradiometric cross-coupled structure has an excellent capability of weakening the environmental electromagnetic interference. In the future, we will further improve the mutual inductance of the second-order gradiometric cross-coupled SQUID current sensor between SQUID loop and input coil, optimize the size and critical current of Josephson junction, in order to improve the input sensitivity of SQUID device, reduce the current noise level and the 1/ f corner frequency, and meet more requirements for TES applications.

Keywords: superconducting quantum interference device, transition-edge sensor, flux noise, current noise, current sensitivity

PACS: 85.25.Dq

DOI: 10.7498/aps.70.20201816

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFF0206105), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61701470, 20161361354), and the National Institute of Metrology China (Grant Nos. AKY1946, AKYZD2012).

[†] Corresponding author. E-mail: zhongq@nim.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: jinjinli@nim.ac.cn