

具有 Washer 型输入线圈的超导量子干涉放大器的制备与表征

陈钊 何根芳 张青雅 刘建设 李铁夫 陈炜

Fabrication and characterization of the superconducting quantum interference device amplifier with Washer type input coil

Chen Zhao He Gen-Fang Zhang Qing-Ya Liu Jian-She Li Tie-Fu Chen Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 128501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.128501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.128501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多通道心磁系统标定方法研究

[Multi-channel magnetocardiography system calibration](#)

物理学报.2014, 63(22): 228501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228501>

HT_cSQUID 低频通信接收机和穿墙通信接收实验

[HighT_cSQUID low frequency receiver and through-wall receiving experiments](#)

物理学报.2014, 63(19): 198501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198501>

应用于弱光探测的热敏超导谐振器

[Thermal-sensitive superconducting coplanar waveguide resonator used for weak light detection](#)

物理学报.2014, 63(7): 070701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.070701>

一种应用于心磁噪声抑制的选择性平均方法研究

[Study of a selective averaging method for magnetocardiography-based noise suppression](#)

物理学报.2013, 62(9): 098501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.098501>

电子器件散粒噪声测试方法研究

[Shot noise measurement methods in electronic devices](#)

物理学报.2011, 60(5): 050704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.050704>

具有Washer型输入线圈的超导量子干涉放大器的制备与表征*

陈钊 何根芳 张青雅 刘建设 李铁夫 陈炜†

(清华大学, 信息科学与技术国家实验室, 微纳电子学系, 微电子学研究所, 北京 100084)

(2014年11月22日收到; 2015年1月26日收到修改稿)

超导量子干涉仪(SQUID)放大器具有低输入阻抗、低噪声、低功耗等优点, 目前被广泛用于微弱信号的检测领域. 与其他工艺相比, Nb/Al-AlO_x/Nb结构的约瑟夫森结具有相对较高的转变温度(T_c)、高的磁通电压调制系数以及良好的热循环能力、较宽的临界电流范围, 因此是制备SQUID放大器的很好选择. 设计并制作了欠阻尼、过阻尼约瑟夫森结以及具有Washer型输入线圈的单SQUID放大器, 通过在He³制冷机3 K温区下对器件电流-电压特性进行测量, 得到良好的结 I - V 特性曲线、SQUID调制特性, 初步实现利用SQUID进行放大作用, 并计算了SQUID的电流分辨率. 此项工作对于超导转变边沿传感器读出电路的实现具有重要的意义.

关键词: 超导量子干涉放大器, 超导量子干涉仪, 约瑟夫森结, 超导转变边沿传感器

PACS: 85.25.Cp, 85.25.Dq, 07.20.Mc

DOI: 10.7498/aps.64.128501

1 引言

超导量子干涉仪(superconducting quantum interference device, SQUID)是目前世界上最灵敏的磁场探测器^[1], 它主要基于两个原理: 磁通量子化和约瑟夫森效应. 一个DC SQUID包括两个并联在超导环路中的约瑟夫森结, 当把SQUID偏置在合适的偏置电流时, 其输出电压会受到输入电流周期性的调制. SQUID最开始的应用是作为检流计(galvanometer)^[2]. 目前, SQUID已经广泛应用于从天文探测到生物磁场检测、材料分析各个领域. SQUID的最大特征是其极高的探测灵敏度^[3], 其等效能量灵敏度接近量子极限^[4], 是目前最灵敏的磁通量传感器^[1]. 如今, DC SQUID被广泛应用于各种高精度的电流及磁通探测中, 其中基于SQUID作为放大器进行读出的超导转变边沿传感器(TES)^[5]目前广泛应用于从天文探测^[6]、粒

子物理到材料科学研究^[7]以及安全检测等各个领域^[8]. 低温SQUID放大器具有低输入阻抗、低噪声^[9]、低功耗等优点, 它可以提供比传统放大器低100倍的本征噪声^[10], 并且可以获得更快的数据扫描速度^[11]. SQUID放大器的基本元器件是过阻尼约瑟夫森结, 高质量的约瑟夫森结是制备SQUID的关键. 与其他工艺相比, Nb/Al-AlO_x/Nb结构的约瑟夫森结具有相对较高的磁通电压调制系数以及良好的热循环能力、较宽的临界电流范围, 因此是制备SQUID放大器的很好选择, 目前已经广泛应用于SQUID放大器的制备中^[12,13].

在最近几年, 虽然SQUID放大器的制备已经取得很大的进展, 但SQUID在实际应用时需要根据其应用场景定制使用, SQUID放大器设计及应用存在很多需要研究和改进之处. 本文首先制备出基于Nb/Al-AlO_x/Nb结构约瑟夫森结, 得到3 K温度下临界电流密度为152 A/cm², 能隙电压为2.83 mV的高质量回滞约瑟夫森结, 开发出一套

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CBA00304)和清华大学自主科研计划(批准号: 20131089314)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weichen@tsinghua.edu.cn

SQUID放大器制备工艺. 设计并制备出过阻尼约瑟夫森结以及多种类型的SQUID放大器, 对具有Washer型输入线圈的单个电流偏置型SQUID放大器在低温下进行 $I-V$ 特性测试, 得到良好调制特性曲线及基本的放大特性; 对是否加入低温特性的LC滤波器^[14], 以及增加输入圈数的SQUID放大特性曲线进行了对比, 并对其电流分辨率^[15]进行了理论计算.

2 器件制备

在制备SQUID放大器的过程中, 其基本元件约瑟夫森结的制备工艺对于器件性能有着关键性的影响. 我们选用Nb/Al-AIO_x/Nb结构约瑟夫森结作为SQUID基本元件, 这种结构可以在高真空环境下完成三层膜的溅射, 从而在结制备过程中不

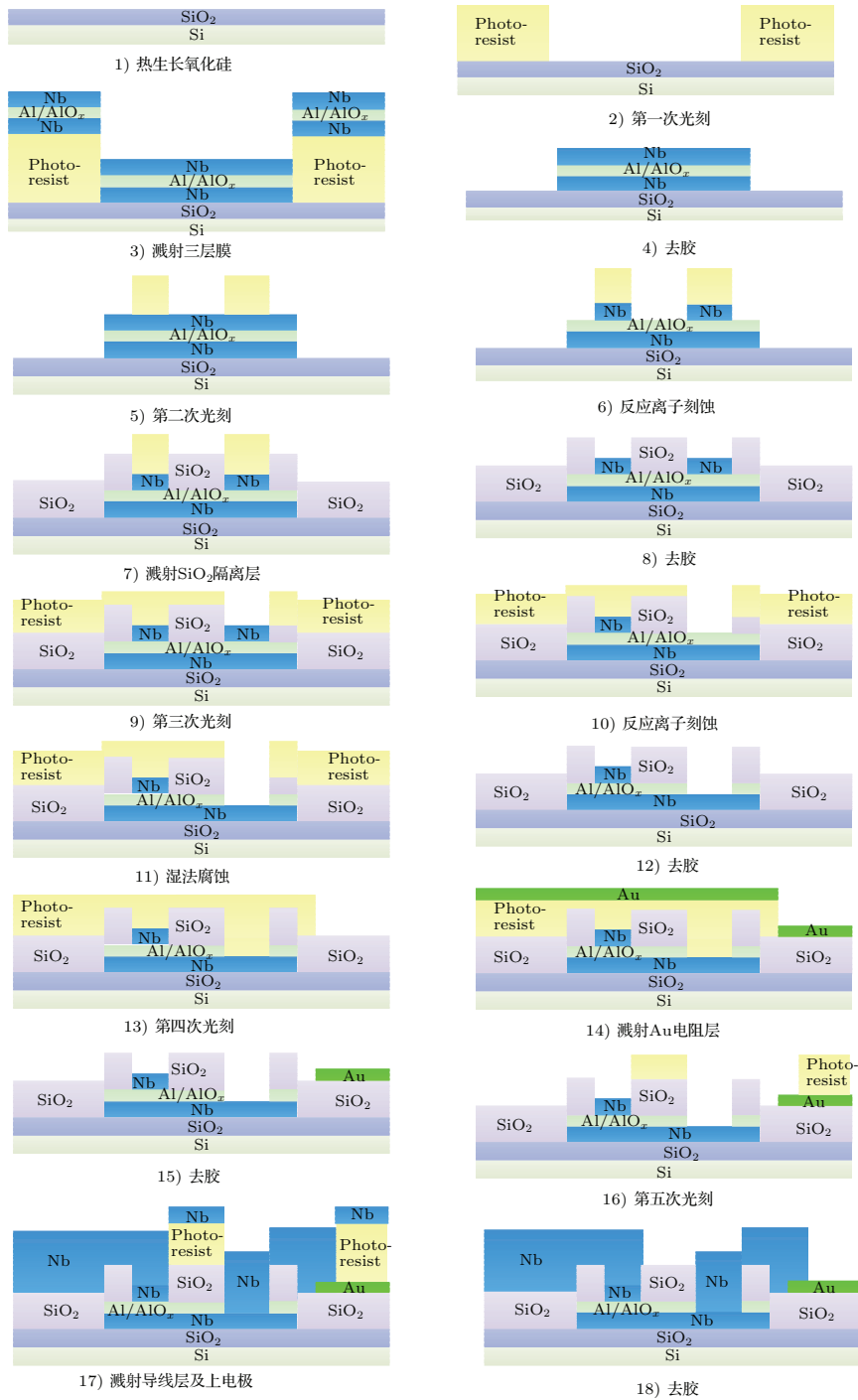


图1 SQUID放大器工艺流程

Fig. 1. Fabrication process of SQUID amplifier.

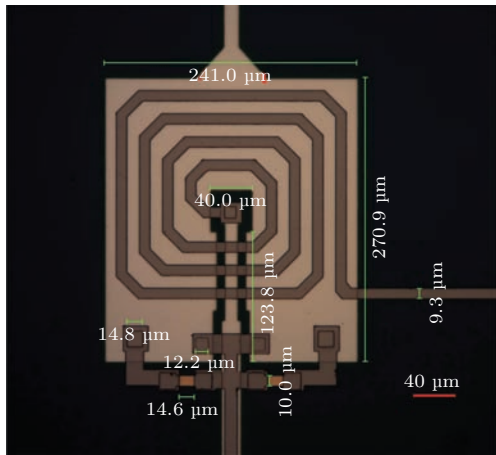


图2 单SQUID放大器图片

Fig. 2. Picture of single SQUID amplifier.

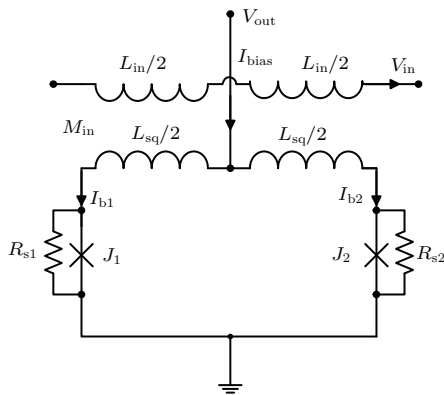


图3 单SQUID放大器电路结构图

Fig. 3. Electric circuit of single SQUID amplifier.

会引入空气的污染, 能确保形成高质量的势垒层结构. 同时, 在进行结区定义及通孔制备过程中, Al 可以作为反应离子刻蚀的天然阻挡层, 这有助于制备过程中精确控制刻蚀深度. 本文开发了一套自对准五次光刻工艺制备约瑟夫森结及 SQUID 的工艺流程, 如图 1 所示. 选用 2 英寸 <100> 晶向 N 型单面抛光硅片进行器件制备 (1 in = 2.54 cm), 通过表面热氧生长 400 nm 厚的 SiO₂ 衬底. 考虑我们制备的三层膜 AlO_x 层非常薄, 因此在进行第一次光刻前采用丙酮+酒精进行超声清洗, 从而确保硅片表面不会残余有机物或者空气污染物引起器件的失效. 第一次光刻的目的是为制备 Nb/Al-AlO_x/Nb 三层膜. Nb 膜制备时需要保证其边缘的平整性, 避免边缘产生尖峰从而可能造成后期对二氧化硅绝缘层的穿透, 引起器件失效. 因此第一次光刻采用双层正性剥离胶光刻工艺; 第二次光刻采用负性剥离胶 NR9-3000PY 进行, 其目的为在三层膜表面定义结区光刻胶图形; 第三次光刻通过反应离子刻蚀

以及 80% H₃PO₄ 湿法腐蚀从而掏空出用于上下电极连接的通孔; 第四次光刻目的是溅射 Au 并联电阻, 溅射时本底真空为 9.9 × 10⁻⁴ Pa, 在溅射 Au 之前为了增加表面黏附力需要溅射一薄层 8 nm 左右的 Ti; 第五次光刻溅射上电极, 在溅射上电极前, 由于 Nb 表面会很容易吸附空气中的氧气成为氧化 Nb, 因此需要进行去氧化层工艺, 然后溅射 350 nm 厚的 Nb 导线层. 图 2 为单 SQUID 放大器在显微镜下观察图片, 图 3 为单 SQUID 放大器电路结构图.

3 器件测试

本文对约瑟夫森结及 SQUID 的测试均在由 Janis 生产的 He³ 制冷机下进行, He³ 制冷机主要有 4 个温区, 分别是 296 K, 40 K, 3 K 及 300 mK. SQUID 测试主要在 3 K 温区进行. 图 4 为 Au 薄膜方块电阻测试结果, 金薄膜电阻主要用于消除普通约瑟夫森结的回滞特性, 从而实现单值的过阻尼约瑟夫森结. 对于方块电阻的测试是从 300 K 一直往下降温测试到 2 K, 主要目的为测试金薄膜低温电阻. 测试结果显示, 对于 60 nm 厚的 Au 薄膜剩余电阻为 0.73 Ω/□. 不同厚度的 Au 薄膜低温下电阻阻值如表 1 所列.

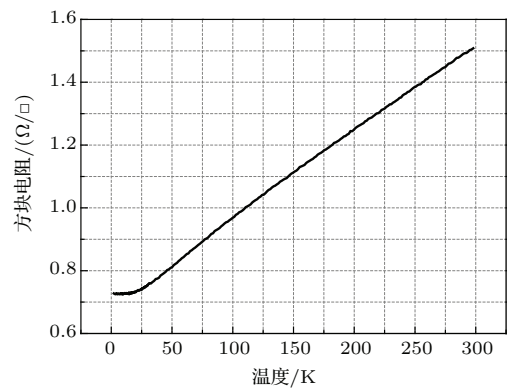


图4 Au 薄膜电阻测试 [16]

Fig. 4. Temperature dependence of square resistance of Au thin film.

普通约瑟夫森结一般都是带回滞特性, 在回滞区域电流电压对应关系不是单值的. 而应用于 SQUID 放大器的约瑟夫森结需要具有单值特性, 这通常通过给约瑟夫森结加一个并联电阻实现. 约瑟夫森结的回滞系数由

$$\beta_c = \frac{2\pi I_{c0} R^2 C}{\Phi_0} \quad (1)$$

决定, 其中, I_{c0} 为无外加磁通时构成 SQUID 的约瑟夫森结的临界电流, R 为结电阻 (包括并联电阻), C 为结电容, Φ_0 为磁通量子. 当 $\beta_c \leq 1$ 时, 构成 SQUID 的约瑟夫森结 I - V 特性为非回滞的, 对于给定输入磁通时 SQUID 两端的电压是一个单值的; 当 $\beta_c > 1$ 结特性为回滞的 [17]. 对于过阻尼约瑟夫森结测试结果如图 5 所示.

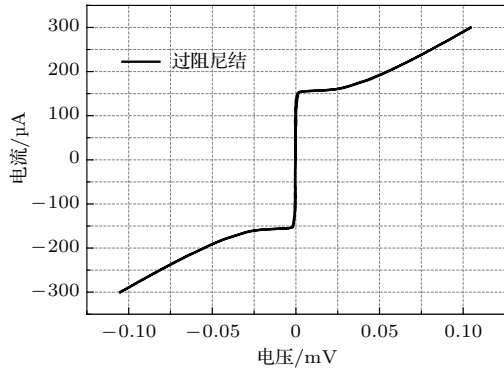


图 5 带并联电阻约瑟夫森结的 I - V 特性 ($9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$)
 Fig. 5. I - V curve of Josephson junction with shunt resistor ($9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$).

图 5 中结面积为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$, 并联电阻 $R_{\text{shunt}} = 0.364 \Omega$, 临界电流大小为 $160 \mu\text{A}$, 临界

电流密度 $J_c = 243.9 \text{ A/cm}^2$. 结电容可以通过公式

$$C_J = SC_s, \quad \frac{1}{C_s} = 0.20 - 0.043 \lg J_c \quad (2)$$

估算 [18], 其中, S 为结面积, J_c 单位为 kA/cm^2 , C_s 单位为 $\mu\text{F/cm}^2$. 可估算出结电容大小约为 $C_J = 3.52 \text{ pF}$, 回滞系数 $\beta_c = 0.23$. 从图 5 可以看出, 约瑟夫森结从超流态转变为常态电阻态过程中是非常平缓过渡的, 此结为没有回滞的过阻尼约瑟夫森结.

表 1 Au 薄膜方块电阻阻值与厚度关系

Table 1. Relationship between square resistance and thickness.

| 薄膜厚度/nm | 温度/K | 方块电阻阻值/(Ω/\square) |
|---------|------|-----------------------------|
| 30 | 6.38 | 5.3852 |
| 45 | 2 | 1.4063 |
| 60 | 2 | 0.7275 |
| 71 | 2 | 0.3558 |
| 85 | 2 | 0.2660 |

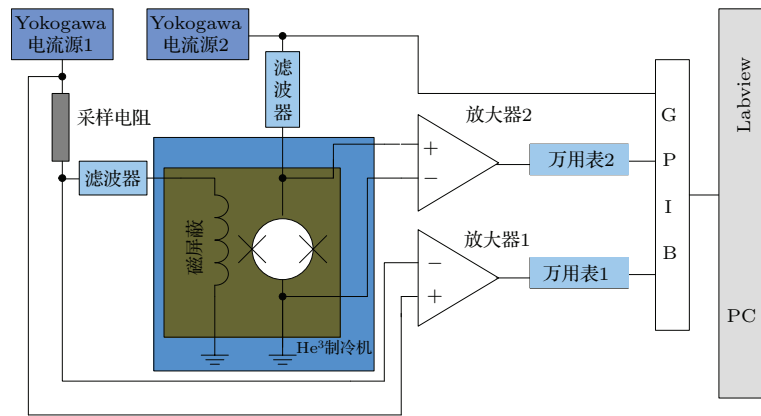


图 6 SQUID 放大器测试电路图

Fig. 6. Test schematic of SQUID amplifier.

电流偏置型 SQUID 放大器工作时, 输入电流信号通过电感转化为 SQUID 环路磁通, 进而引起临界电流的变化, 从而转化为 SQUID 两端输出电压, 因此该类型 SQUID 放大器为跨阻放大器. 通常的电流、电压或功率放大器的增益由分贝数给出, 而对于跨阻放大器的增益则由

$$A = \frac{V_{\text{out,pp}}}{I_{\text{in,pp}}} \quad (3)$$

决定, 其中, $V_{\text{out,pp}}$ 为输出电压峰峰值, $I_{\text{in,pp}}$ 为输

入电流峰峰值.

最后, 我们对 Washer 型 SQUID 进行测试, 待测样品如图 2 所示, 测试电路图如图 6 所示, SQUID 临界电流约为 $550 \mu\text{A}$. 测试调制特性时, 将 SQUID 偏置电流设置为固定值 $551 \mu\text{A}$, 同时在输入线圈输入一个从 0 到 $48 \mu\text{A}$ 线性变化的电流, 得到如图 7 所示的调制特性曲线. 其中, 输入电流为 $8.073 \mu\text{A}$, 对应输入电感在 SQUID 上引入

一个输入磁通量子的磁通变化, 输入线圈电感与 SQUID 自感之间的互感大小约为 $M_{in} = 0.256 \text{ nH}$. 考虑将输入电流偏置在 $2 \text{ }\mu\text{A}$ 的偏置电流上, 此处对应输入电感在 SQUID 上引入 $\Phi_0/4$ 磁通位置, 得到输入输出放大特性如图 8 所示.

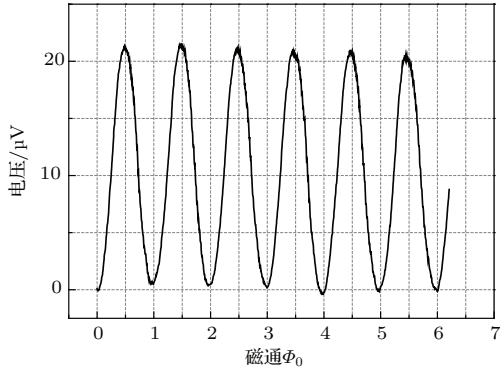


图 7 单 SQUID 放大器输入电流调制特性曲线

Fig. 7. Corresponding $V-\Phi$ characteristic of the DC SQUID amplifier.

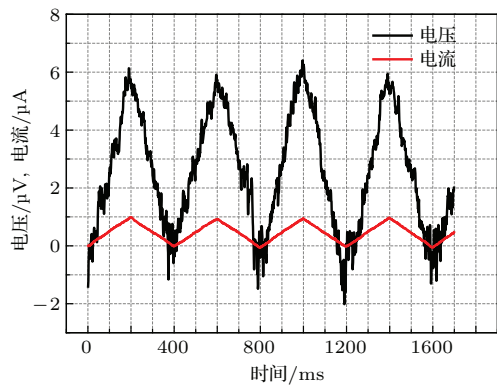


图 8 单 SQUID 放大器放大特性曲线

Fig. 8. Amplification curve of single SQUID amplifier.

如图 8 所示, 输入电流峰峰值为 $1 \text{ }\mu\text{A}$, 输出电压峰峰值为 $6 \text{ }\mu\text{V}$. 通过此单 SQUID 放大器可以实现 $6 \text{ }\Omega$ 的增益. 但是此结果还存在两个问题: 一是放大倍数不够大; 二是系统噪声过大. SQUID 放大倍数的增加可以通过增加输入线圈匝数实现, 而系统噪声的处理上我们可以加上用于 He^3 制冷机内部的低温特性 LC 滤波器.

当增加输入线圈匝数时, 测试样品如图 9 所示. 通过增加输入线圈匝数, 并且加上用于 He^3 制冷机内部的低温特性的 LC 滤波器后得到的结果如图 10 和图 11 所示.

SQUID 临界电流约为 $72 \text{ }\mu\text{A}$, 将 SQUID 偏置电流设置为固定值 $89.4 \text{ }\mu\text{A}$, 同时在输入线圈输入一个从 0 到 $10 \text{ }\mu\text{A}$ 线性变化电流, 得到如图 10 所示

调制特性曲线. 其中, 输入电流 $2.67 \text{ }\mu\text{A}$ 对应输入电感在 SQUID 上引入一个输入磁通量子的磁通变化, 互感大小约为 $M_{in} = 0.774 \text{ nH}$. 考虑将输入电流偏置在 $0.65 \text{ }\mu\text{A}$ 的偏置电流上, 此处对应输入电感在 SQUID 引入 $\Phi_0/4$ 磁通位置, 得到输入输出放大特性如图 11 所示.

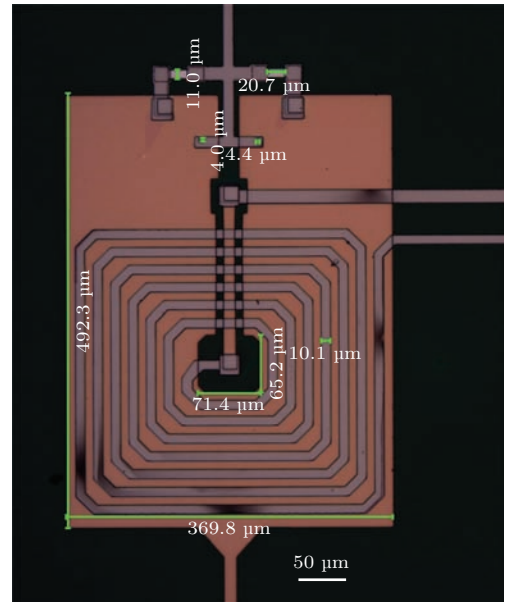


图 9 当增加输入线圈匝数时, 单 SQUID 放大器图片
Fig. 9. Picture of single SQUID amplifier after increasing the input line number of loops.

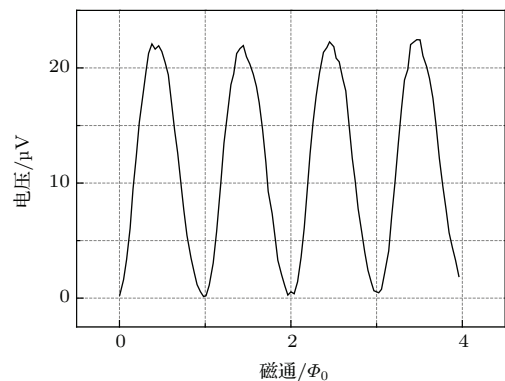


图 10 当增加输入线圈匝数时, 单 SQUID 放大器输入电流调制特性曲线

Fig. 10. Corresponding $V-\Phi$ characteristic of the DC SQUID amplifier after increasing the input line number of loops.

如图 11 所示, 输入电流峰峰值为 $0.3 \text{ }\mu\text{A}$, 输出电压峰峰值为 $7.5 \text{ }\mu\text{V}$. 通过此 SQUID 放大器可以实现 $25 \text{ }\Omega$ 的增益. 并且可以看出, 当加上用于 He^3 制冷机内部的低温特性的 LC 滤波器后, 系统噪声减小, 增加输入线圈匝数使得 SQUID 放大倍数增加.

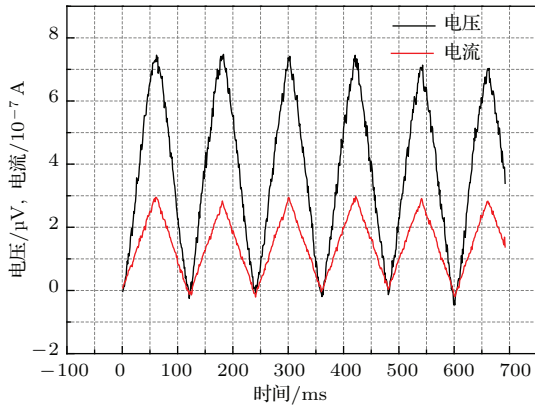


图 11 当增加输入线圈匝数时, 单 SQUID 放大器放大特性曲线

Fig. 11. Amplification curve of single SQUID amplifier after increasing the input line number of loops.

对于单个电流偏置 SQUID 放大器, 由于其放大倍数较小, 噪声容易被系统噪声所淹没^[19]. 如图 12 所示, N_0 是将 SQUID 偏置在 $0 \mu\text{A}$, 得到的电流噪声谱, N_w 是将 SQUID 偏置在 $89.4 \mu\text{A}$, 得到的电流噪声谱. 根据图 12 所示结果可以看到, SQUID 工作噪声已经被淹没在系统的噪声之中, 因此无法测量得到 SQUID 放大器的电流噪声谱. 但是可以通过计算得到其本征噪声并通过本征噪声计算出电流分辨率. SQUID 放大器本征噪声计算公式为

$$S_{\text{int}} = 16k_B T R_s, \quad (4)$$

其中, S_{int} 为单个 SQUID 本征噪声, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, R_s 为 SQUID 结并联电阻^[16]. SQUID 的电流分辨率计算公式为

$$I_{\text{noise},a} = \frac{V_{\text{noise}}}{A} = \frac{\sqrt{S_{\text{int}}}}{M_{\text{in}} V_{\Phi,i}}, \quad (5)$$

其中, $V_{\Phi,i}$ 为磁通电压转换系数, 大小为 $V_{\Phi,i} = 2\Delta V/\Phi_0$; ΔV 为调制深度^[16].

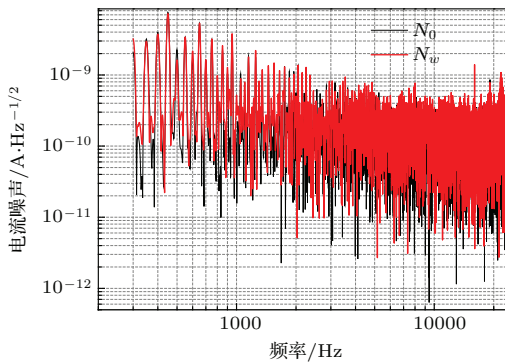


图 12 电流噪声谱

Fig. 12. Current noise spectrum.

已知并联电阻 $R_s = 1.2 \Omega$, 互感大小为 $M_{\text{in}} = 0.774 \text{ nH}$, $\Delta V = 22.5 \mu\text{V}$, 并且 SQUID 工作在 3 K 温区, 通过 (4) 和 (5) 式计算可得该 SQUID 放大器电流分辨率为 $1.7 \text{ pA}/\text{Hz}^{1/2}$.

4 结 论

本文开发出一套 SQUID 放大器制备工艺. 设计并制备出过阻尼约瑟夫森结以及单器件 Washer 型 SQUID 放大器, 并对约瑟夫森结及 DC SQUID 电学特性进行了测试, 得到良好的过阻尼约瑟夫森结 I - V 特性及 SQUID 调制特性, 并对 SQUID 放大器的电流分辨率进行了理论计算. 本文结论为后期开发用于读出 TES 的 SQUID 放大器提供了很好的工作基础.

感谢李浩在噪声测试方面的大力帮助, 感谢 Kamal 的有益讨论.

参考文献

- [1] Ryu C, Blackburn P W, Blinova A A, Boshier M G 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 205301
- [2] Clarke J 1966 *Philos. Mag.* **13** 115
- [3] Mol J M, Foroughi F, Arps J, Kammerloher E, Bethke P, Gibson Jr G W, Fung Y K K, Klopfer B, Nowack K, Kratz P A, Huber M E, Moler K A, Kirtley J R, Bluhm H 2014 *APS March Meeting* **59** B24.00011
- [4] Granata C, Vettoliere A, Russo R, Fretto M, de Leo N, Lacquaniti V 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 102602
- [5] Zhang Q Y, Dong W H, He G F, Li T F, Liu J S, Chen W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 220305 (in Chinese) [张青雅, 董文慧, 何根芳, 李铁夫, 刘建设, 陈炜 2014 物理学报 **63** 220305]
- [6] Jackson B D, de Korte P A J, van der Kuur J, Mauskopf P D, Beyer J, Bruijn M P, Cros A, Gao J R, Griffin D, den Hartog R 2012 *IEEE Trans. Thz. Sci. Technol.* **2** 12
- [7] Guo Z C, Suo H L, Liu Z Y, Liu M, Ma L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 177401 (in Chinese) [郭志超, 索红莉, 刘志勇, 刘敏, 马麟 2012 物理学报 **61** 177401]
- [8] Irwin K 2014 *APS March Meeting* **59** F23.00003
- [9] de Korte P A J, Beyer J, Deiker S, Hilton G C, Irwin K D, MacIntosh M 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 3807
- [10] Zhao J, Zhang Y, Lee Y H, Krause H J 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 054707
- [11] van Bibber K, Rosenberg L J 2006 *Phys. Today* **59** 30
- [12] Kiviranta M, Grönberg L, Sipola H 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 045003
- [13] Zakosarenko V, Schulz M, Krüger A, Heinz E, Anders S, Peiselt K 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 015011

- [14] Wu W, Jia K, Li T F, Wang J L, Liu J S, Chen W 2010 *Chin. Sci. Bull.* **55** 1969 (in Chinese) [吴威, 贾开, 李铁夫, 王吉林, 刘建设, 陈炜 2010 科学通报 **55** 1969]
- [15] Tuttle J G, DiPirro M J, Shirront P J, Welty R P, Radparvar M 1996 *Cryogenics* **36** 879
- [16] He G F 2014 *M. S. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [何根芳 2014 硕士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [17] Podt M 2003 *Ph. D. Dissertation* (Enschede: Twente University)
- [18] Maezawa M, Aoyagi M, Nakagawa H, Kurosawa I, Takada S 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 2134
- [19] He G F, Zhang Q Y, Li G, Chen Z, Dong W H, Liu J S, Li T F, Chen W 2014 *Chin. J. Low. Temp. Phys.* **36** 410 (in Chinese) [何根芳, 张青雅, 李刚, 陈钊, 董文慧, 刘建设, 李铁夫, 陈炜 2014 低温物理学报 **36** 410]

Fabrication and characterization of the superconducting quantum interference device amplifier with Washer type input coil*

Chen Zhao He Gen-Fang Zhang Qing-Ya Liu Jian-She Li Tie-Fu Chen Wei[†]

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Micro and Nanoelectronics, Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 22 November 2014; revised manuscript received 26 January 2015)

Abstract

Superconducting quantum interference device (SQUID) amplifier is best known for its low input impedance, low noise and low power consumption. Nowadays it is widely used for detecting the weak signals. Compared with other methods, the Nb/Al-AlO_x/Nb structure Josephson junction based SQUID has the advantages of high transition temperature, high voltage flux modulation index and good heat recycle ability, wide critical voltage range, so it is a very good option for making SQUID amplifier. In this work, we fabricate the overdamped Josephson junction and washer dc SQUID, and test the *I-V* characteristics at He³ 3 K stage temperature and calculate the current resolution of SQUID. The result of SQUID modulation property is good. The magnification becomes larger after increasing the input line number of loops, and the system noise becomes smaller after the join of the LC filter. This work is very important for designing and manufacturing transition edge sensor readout circuits.

Keywords: superconducting quantum interference device amplifier, superconducting quantum interference device, Josephson junction, transition edge sensor

PACS: 85.25.Cp, 85.25.Dq, 07.20.Mc

DOI: 10.7498/aps.64.128501

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CBA00304) and the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, China (Grant No. 20131089314).

† Corresponding author. E-mail: weichen@tsinghua.edu.cn