

低噪声超导量子干涉器件磁强计设计与制备

韩昊轩 张国峰 张雪 梁恬恬 应利良 王永良 彭炜 王镇

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

Han Hao-Xuan Zhang Guo-Feng Zhang Xue Liang Tian-Tian Ying Li-Liang Wang Yong-Liang Peng Wei Wang Zhen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 138501 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190483

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190483>

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

具有Washer型输入线圈的超导量子干涉放大器的制备与表征

Fabrication and characterization of the superconducting quantum interference device amplifier with Washer type input coil
物理学报. 2015, 64(12): 128501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.128501>

利用相干制备的三能级原子介质实现低噪声弱光相位操控

Low-noise optical field phase-shifting manipulated using a coherently-prepared three-level atomic medium
物理学报. 2017, 66(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024205>

新型超导量子比特及量子物理问题的研究

Novel superconducting qubits and quantum physics
物理学报. 2018, 67(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180845>

部分耗尽结构绝缘体上硅器件的低频噪声特性

Low frequency noise behaviors in the partially depleted silicon-on-insulator device
物理学报. 2015, 64(10): 108501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.108501>

利用超导量子电路模拟拓扑量子材料

Topological quantum material simulated with superconducting quantum circuits
物理学报. 2018, 67(22): 220302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181857>

用于精密测量玻尔兹曼常数的量子电压噪声源芯片研制

Development of quantum voltage noise source chip for precision measurement of Boltzmann constant
物理学报. 2018, 67(10): 108501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172643>

低噪声超导量子干涉器件磁强计设计与制备

韩昊轩¹⁾²⁾³⁾ 张国峰^{1)2)†} 张雪¹⁾²⁾³⁾ 梁恬恬¹⁾²⁾³⁾ 应利良¹⁾²⁾
王永良¹⁾²⁾ 彭炜¹⁾²⁾³⁾ 王镇¹⁾²⁾³⁾

1) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

2) (中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海 200050)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2019年4月2日收到; 2019年5月6日收到修改稿)

超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 作为一种极灵敏的磁通传感器, 在生物磁探测、低场核磁共振、地球物理等领域得到广泛应用. 本文介绍了一种基于 SQUID 的高灵敏度磁强计, 由 SQUID 和一组磁通变压器组成. SQUID 采用一阶梯度构型, 增强其抗干扰性. 磁通变压器由多匝螺旋的输入线圈和大尺寸单匝探测线圈组成, 其中输入线圈与 SQUID 通过互感进行磁通耦合. 利用自主工艺平台, 在 4 英寸硅衬底上完成了基于 Nb/Al-AlO_x/Nb 约瑟夫森隧道结的 SQUID 磁强计制备. 低温测试结果显示, 该磁强计磁场灵敏度为 0.36 nT/Φ₀, 白噪声段磁通噪声为 8 μΦ₀/√Hz, 等效磁场噪声为 2.88 fT/√Hz.

关键词: 超导量子干涉器件, 磁强计, 磁通噪声

PACS: 85.25.Dq, 07.55.Ge

DOI: 10.7498/aps.68.20190483

1 引言

超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是一种极为灵敏的磁通传感器, 原则上可以探测一切可以转化为磁通的物理量. 在结构上主要由超导环和约瑟夫森结组成. 根据环中约瑟夫森结的数量分类, 含有一个结的称为交流 (rf)SQUID, 含有两个结称为直流 (dc) SQUID. 根据组成超导材料来分类, 又可分为低温 SQUID 和高温 SQUID. 其中, 低温 dc SQUID 不论在噪声性能、工艺稳定性、读出电路组成方面都有明显优势, 在生物磁探测、低场核磁共振成像、地球物理探测等方面具有广泛应用^[1-3]. 本文主要介绍基于 Nb/Al-AlO_x/Nb 约瑟夫森结的低温 dc SQUID 的制备.

约瑟夫森结通常具有回滞的电流-电压特性曲

线^[4], 因此在组成 SQUID 时需要并联电阻以消除回滞, 一般要求回滞系数 $\beta_c = 2\pi I_c R^2 C / \Phi_0 \leq 1$, 其中 I_c 为结临界电流, R 为结并联电阻, C 为结电容, Φ_0 为磁通量子 (2.07×10^{-15} Wb). SQUID 超导环的大小决定了其磁场灵敏度, 环越大则灵敏度越高, 反之亦然. 但是, 环尺寸太大会造成 SQUID 电感增加. 根据仿真结果^[5], 在优化条件 $\beta_c = \beta_L = 1$ 下, 磁通噪声 $(\sqrt{S_\Phi})^2 = 16k_B T L^2 / R$, 其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, L 为 SQUID 电感, 可以看到 SQUID 电感增加会引起磁通噪声提高. 因此, 当被用作磁探测器件时, SQUID 通常与超导磁通变压器共同组成磁强计, 如图 1 所示. 磁通变压器是一组由输入线圈 L_{in} 和探测线圈 L_p 组成的超导环路, 输入线圈与 SQUID 之间通过互感 M_{in} 进行磁通耦合. 探测线圈的有效面积 A_{eff} 与 SQUID 磁通噪声共同决定了 SQUID 磁场噪声, 即: $\sqrt{S_B} = \sqrt{S_\Phi} / A_{eff}$.

† 通信作者. E-mail: gfzhang@mail.sim.ac.cn

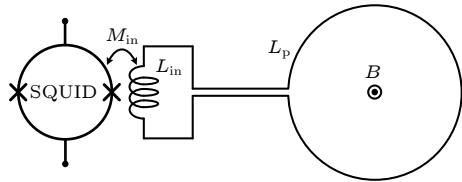


图 1 SQUID 磁强计示意图
Fig. 1. Schematic diagram of SQUID magnetometer.

SQUID 由于具有阻抗小、噪声低的特点, 当与室温放大电路连接时会造成失配. Drung 等^[6]利用低温附加正反馈电路 (additional positive feedback, APF) 提升磁通-电压转换系数, 实现直读噪声 1.6 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Schmelz 等^[7]同样利用 APF 对亚微米结工艺制备的磁强计进行测试, 得到了低于 1 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的噪声性能. Xie 等^[8]利用自举电路 (SQUID bootstrap circuit, SBC) 也得到 2 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁强计噪声性能. 近期, Zeng 等^[9]研发欠阻尼 SQUID, 省略了附加反馈电路, 牺牲少量噪声性能得到更加简单实用的直读器件, 噪声性能仍然达到 5 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$. 本文基于欠阻尼 SQUID 设计, 通过提升器件有效面积获得更高灵敏度, 实现低噪声磁强计制备, 用于多通道生物磁探测系统.

得益于半导体工艺的飞速发展, SQUID 现在也可以在整片晶圆上实现制备. 目前, 最为成熟标准的平面工艺包括选择铌刻蚀工艺 (selective niobium etch process, SNEP)^[10]. 本文根据自主工艺平台特点, 对 SNEP 做适当修改, 进行了高灵敏度 SQUID 磁强计制备, 并对器件电流-电压特性、磁通调制特性和噪声性能等进行了测试表征.

2 SQUID 磁强计设计

图 2 显示了 SQUID 磁强计设计图, 其中 SQUID

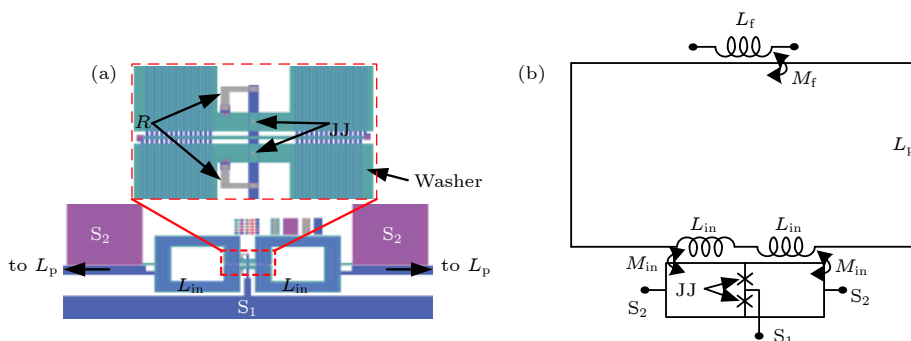


图 2 (a) SQUID 磁强计设计图; (b) 等效电路图
Fig. 2. (a) Design of SQUID magnetometer and (b) the schematic diagram.

部分采用了一阶梯度的并联电感设计, 这样设计有两个优点: 一是增加 SQUID 有效面积但是电感并没有显著增加; 二是一阶梯度增加了 SQUID 抗共模干扰的能力^[11]. SQUID 电感采取经典的垫圈结构, 这样有利于集成输入线圈与 SQUID 间的有效磁通耦合.

磁通变压器由两部分组成: 输入线圈和探测线圈. 输入线圈为螺旋多匝结构, 集成在 SQUID 垫圈结构之上, 每个垫圈之上线圈匝数一致但是绕向相反, 总输入电感为两组线圈串联之和. 探测线圈为单匝平面电感, 线圈尺寸和线宽决定了磁场探测有效面积. 一般情况下, 要求探测线圈和输入线圈电感值相等, 可以实现最佳的磁通转换效率. 本文为了保证磁强计的磁场灵敏度, 尽量增加探测线圈的几何尺寸, 相关设计参数见表 1.

3 SQUID 磁强计制备工艺

本文采用的平面工艺基于标准 SNEP 工艺, 再结合自主工艺平台特点, 创新点在于利用反应离子刻蚀工艺 (RIE) 同时对结区和底电极进行图形加工, 优点在于避免 Al-AIO_x 势垒层的单独光刻加工, 从而避免了 Al 与碱性显影液反应的可能. 具体的工艺流程如图 3 所示.

(a) Nb/Al-AIO_x/Nb 三层膜沉积. 利用直流磁控溅原位生长 Nb/Al-AIO_x/Nb 三层膜^[13-19]. 薄膜沉积参数见表 2. 其中, 薄膜沉积背景真空为 2.3×10^{-5} Pa, Nb 薄膜和 Al 薄膜均采用恒定电流模式, 分别在 1.5 A 和 0.3 A 下实现生长速率为 1.2 nm/s 和 0.25 nm/s. Al 薄膜在不破坏真空的情况下在纯氧气中进行原位氧化, 利用氧化气压和氧化时间来决定 AIO_x 势垒层的厚度, 从而决定结临界电流密

表 1 SQUID 磁强计设计参数

Table 1. Design parameters of SQUID-magnetometer.

参数	数值	单位
约瑟夫森结 Josephson junction		
尺寸 A_J	4×4	μm^2
临界电流 I_c	8	μA
结电容 $C^{[12]}$	0.56	pF
并联电阻 R	10	Ω
SQUID		
垫圈内边长 a	100	μm
线宽 w_s	300	μm
总电感 L_s	350	pH
输入线圈		
线圈匝数 N	15	—
线宽 w_{in}	3	μm
线距 s_{in}	3	μm
探测线圈		
线圈尺寸 A_p	15×15	mm^2
线宽 w_p	100	μm

度^[19]. 本文采用 2.6 kPa 纯氧中氧化 12h 实现 50 A/cm^2 临界电流密度. 为了实现后续工艺过程, 上下

层 Nb 薄膜均采用 100 nm.

(b) 底电极预定义: 利用接触式紫外光刻工艺对底电极进行预定义, 配合 RIE 对顶层 Nb 薄膜进行刻蚀. 然后在不去胶的情况下, 再利用离子束刻蚀对势垒层进行物理刻蚀. 此时, 保留了底层 Nb 薄膜.

(c) 定义结区和底电极: 再次进行光刻, 主要用于实现结区图形. 当进行 RIE 工艺时, 顶层和底层 Nb 将被同时刻蚀. 其中, 上一步中预留的势垒层将作为底电极的刻蚀阻止层, 从而实现与结区的同时实现, 如图 3(c) 所示.

(d) 结并联电阻: 本文中电阻采用钼薄膜电阻实现, 通过磁控溅射法制备. 其中电阻加工可以通过剥离 (lift-off) 或 RIE 刻蚀实现.

(e) 二氧化硅 SiO_2 绝缘层: 利用 PECVD(等离子体增强化学气相沉积) 技术进行 SiO_2 绝缘层的沉积. 同样利用 RIE 进行刻蚀, 实现结区电极和电阻电极的通孔.

(f) 顶电极和线圈定义: 顶电极 Nb 薄膜采用上述相同的沉积条件. 在该步骤中实现了输入线圈、

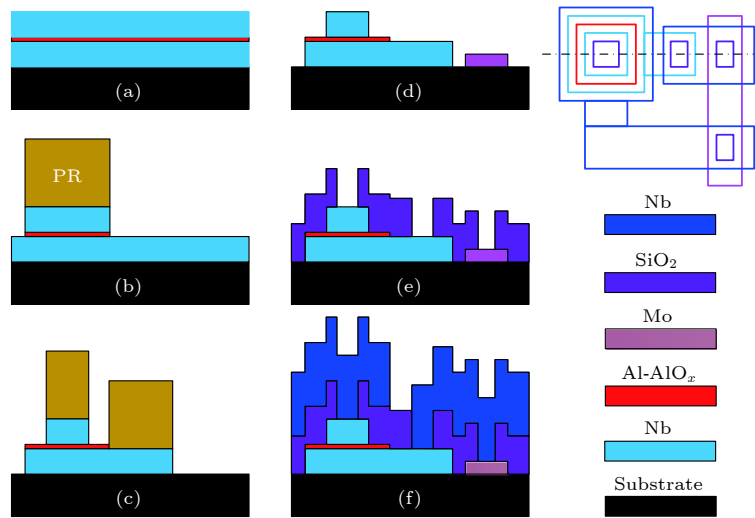


图 3 器件工艺流程图

Fig. 3. Process flow chart of SQUID magnetometer.

表 2 Nb/Al-AlO_x/Nb 三层膜生长参数

Table 2. Deposition parameters of Nb/Al-AlO_x/Nb trilayer.

薄膜	背景真空	Ar流量	Ar气压	恒电流	生长速率	厚度
底层Nb	$2.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$	10 sccm	0.573 Pa	1.5 A	1.2 nm/s	100 nm
Al	$3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$	10 sccm	0.573 Pa	0.3 A	0.25 nm/s	10 nm
AlO _x		氧气气压: 2.6 kPa; 氧化时间: 12 h				~2 nm
顶层Nb	$2.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$	10 sccm	0.573 Pa	1.5 A	1.2 nm/s	100 nm

探测线圈、反馈线圈、顶电极以及结和电阻之间的连接.

4 SQUID 磁强计测试结果

器件工作所需的低温环境利用液氮 (4.2 K) 来实现. 为了获得器件本征性能, 需要对外界环境干扰进行有效屏蔽, 因此本实验一方面利用铌屏蔽筒在低温下实现超导屏蔽, 另一方面将杜瓦等低温测试系统置于磁屏蔽室 (MSR) 内, 在屏蔽室内利用读出电路调节 SQUID 最佳工作点, 同时在屏蔽室外完成数据采集.

SQUID 磁强计测试表征利用自主研制的直读电路完成. 与传统磁通调制读出电路不同的是, 该直读电路利用并联前放技术获得较低的电压噪声 [20], 可以实现与 SQUID 之间的直接放大读出. 读出电路利用磁通锁定环 (flux-locked loop, FLL) 技术实现 SQUID 线性化读出 [21], 即利用闭环负反馈技术将周期、非线性的 SQUID 调制信号转化为随外场线性变化的磁传感系统.

图 4(a) 显示了 SQUID 磁强计的电流-电压特性测试曲线, 三条曲线分别对应外加磁通 $n\Phi_0$, $(n+1/2)\Phi_0$ 和 $(2n+1)\Phi_0/4$. SQUID 临界电流为 $32 \mu\text{A}$, 导致此时回滞系数 $\beta_c > 1$, 再通过下文的测试结果分析, 此时器件工作于欠阻尼情况下, 此即所谓的欠阻尼 SQUID [9], 具有较大的磁通-电压转换系数 ($\partial V/\partial\Phi$), 更加适合于直读电路.

图 4(b) 显示了不同偏置电流下的电压-磁通调制曲线, 最大调制幅度达到 $47 \mu\text{V}$, 使工作点 W 处的 $\partial V/\partial\Phi = 146 \mu\text{V}/\Phi_0$. 利用自制低噪声直读电路, 对该磁强计进行了噪声测试, 噪声曲线如图 5 所示. 可以看到, 在白噪声段, 器件磁通噪声达到 $8\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$. 利用亥姆霍兹线圈构建均匀标定磁场, 对该磁强计进行了有效面积标定. 通过施加若干组已知磁场, 监测 SQUID 输出, 再通过线性拟合得到 $1/A_{\text{eff}} = 0.36 \text{ nT}/\Phi_0$. 再根据 $\sqrt{S_B} = \sqrt{S_\Phi}/A_{\text{eff}}$, 获得磁强计等效磁场噪声为 $2.88 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. 相关测试结果汇总在表 3 中.

测试结果显示, 采用大尺寸耦合线圈, SQUID 灵敏度得到提升 [22]. 由于灵敏度不仅与线圈尺寸相关, 而且与输入线圈电感匹配及输入线圈与 SQUID 之间的有效磁通耦合相关, 因此该设计还可以进一步优化输入线圈匝数及调整探测线圈线

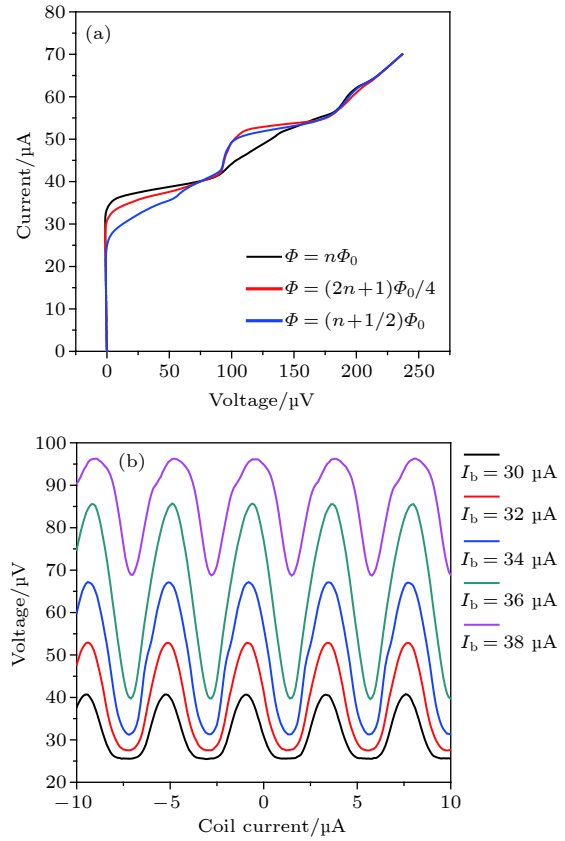


图 4 (a) 电流-电压特性曲线; (b) 不同偏置电流下的电压-线圈电流 (磁通) 调制曲线, 其中调制周期为 $4.3 \mu\text{A}/\Phi_0$.
Fig. 4. (a) Current-voltage curves; (b) voltage-coil current (flux) curves under different bias currents with a period of $4.3 \mu\text{A}/\Phi_0$.

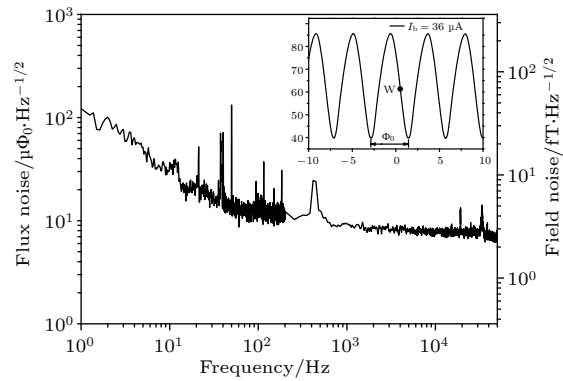


图 5 SQUID 磁强计噪声曲线 曲线中出现的杂峰主要是实验室震动干扰导致, 插图显示的是最佳工作点 (W) 时调制曲线
Fig. 5. Noise figure of SQUID magnetometer, in which the lines between 10–200 Hz were mainly caused by vibrations in the laboratory. The inset shows the modulation curve with the best working point.

宽以获得最佳的磁通传输效率, 来获得更高的探测灵敏度.

表 3 SQUID 磁强计测试结果

Table 3. Measured results of SQUID magnetometer.

参数	数值	单位
临界电流 I_0	32	μA
正常态电阻 R_n	5	Ω
反馈线圈耦合系数 $1/M_f$	4.3	$\mu\text{A}/\Phi_0$
最大调制峰峰值 V_{pp}	47	μV
磁通噪声 $\sqrt{S_\Phi}$ (白噪声)	8	$\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$
磁场灵敏度 $1/A_{\text{eff}}$	0.36	nT/Φ_0
磁场噪声 $\sqrt{S_B}$ (白噪声)	2.88	$\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$

5 结 论

本文介绍了一种基于 Nb/Al-AlO_x/Nb 约瑟夫森结的 SQUID 磁强计. 利用自主工艺线在 4 英寸硅衬底上完成了大尺寸、高灵敏度 SQUID 磁强计的制备, 实现器件磁场灵敏度达到 0.36 nT/ Φ_0 , 器件磁场噪声性能在白噪声段达到 2.88 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$. 该 SQUID 磁强计适用于构建多通道探测系统, 在人体心磁、脑磁等生物磁探测中得到应用. 值得一提的是, 随着 SQUID 磁强计芯片尺寸的增加, 对晶圆平面工艺稳定性和可靠性提出了更高的要求, 最直接的反映就是芯片良率. 目前, 我们实现了 4 英寸硅衬底上最佳片上良率 50% 以上, 但是不同批次之间仍有起伏, 这也是未来 SQUID 工艺方面应重点改进的地方.

参考文献

[1] Zhang S, Zhang G, Wang Y, Liu M, Li H, Qiu Y, Zeng J, Kong X, Xie X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 128501

[2] Dong H, Wang Y, Zhang S, Sun Y, Xie X 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 115009

[3] Rong L, Jiang K, Pei Y, Wu J, Wang Y 2016 *Chin. J. Sci. Instrum.* **37** 12 (in Chinese) [荣亮亮, 蒋坤, 裴易峰, 伍俊, 王远 2016 仪器仪表学报 **37** 12]

[4] Josephson B D 1962 *Phys. Lett.* **1** 251

[5] Tesche C D, Clarke J 1977 *J. Low Temp. Phys.* **27** 301

[6] Drung D, Matz H, Koch H 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 3008

[7] Schmelz M, Stolz R, Zakosarenko V, Schoenau T, Anders A, Fritzsche L, Mueck M, Meyer H G 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 065009

[8] Xie X, Zhang Y, Wang H, Wang Y, Mueck M, Dong H, Krause H J, Braginski A I, Offenhaeusser A, Jiang M 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 065016

[9] Zeng J, Zhang Y, Mueck M, Krause H J, Braginski A I, Kong X, Xie X, Offenhaeusser A, Jiang M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 042601

[10] Gurvitch M, Washington M A, Hugins H A 1983 *Appl. Phys. Lett.* **42** 472

[11] Zhang G, Zhang Y, Zhang S, Krause H J, Wang Y, Liu C, Zeng J, Qiu Y, Kong X, Dong H, Xie X, Offenhaeusser A, Jiang M 2012 *Physica C* **480** 10

[12] Xiong W, Xu W, Wu Y, Li G, Ying L, Peng W, Ren J, Wang Z 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 1300605

[13] Yuda M, Kuroda K, Nakano J 1987 *Jpn. J. Appl. Phys.* **26**

[14] Kuroda K, Yuda M 1988 *Jpn. J. Appl. Phys.* **63** 2352

[15] Imamura T, Hasuo S 1989 *IEEE Trans. Magn.* **3** 3029

[16] Booij P A A, Livingston C A, Benz S P 1993 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* MAG-25 1119

[17] Sukuda K, Kawai J, Uehara G, Kado H 1993 *IEEE Trans. Magn.* **3** 2944

[18] Amos R S, Breyer P E, Huang H H, Lichtenberger A W 1995 *IEEE Trans. Magn.* **5** 2326

[19] Kang X, Ying L, Wang H, Zhang G, Peng W, Kong X, Xie X, Wang Z 2014 *Physica C* **503** 29

[20] Zhao J, Zhang Y, Lee Y H, Krause H J 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 054707

[21] Clarke J, Goubau W M, Ketchen M B 1976 *J. Low. Temp. Phys.* **25** 99

[22] Zhang X, Zhang G, Ying L, Xiong W, Han H, Wang Y, Rong L, Xie X, Wang Z 2018 *Physica C* **548** 1

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

Han Hao-Xuan¹⁾²⁾³⁾ Zhang Guo-Feng^{1)2)†} Zhang Xue¹⁾²⁾³⁾
 Liang Tian-Tian¹⁾²⁾³⁾ Ying Li-Liang¹⁾²⁾ Wang Yong-Liang¹⁾²⁾
 Peng Wei¹⁾²⁾³⁾ Wang Zhen¹⁾²⁾³⁾

1) (*State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

2) (*Chinese Academy of Sciences, Center for Excellence in Superconducting Electronics, Shanghai 200050, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 2 April 2019; revised manuscript received 6 May 2019)

Abstract

Superconducting quantum interference device (SQUID) is the most sensitive magnetic flux sensor known, which is widely used in biomagnetism, low-field nuclear magnetic resonance, geophysics, etc. In this paper, we introduce a high-sensitivity SQUID magnetometer, which consists of an SQUID and a flux transformer. The SQUID is first-order gradiometer configuration, which is insensitive to interference noise. The flux transformer includes a multi-turn spiral input coil and a large-sized pickup coil. And the input coil is inductively coupled to the SQUID through mutual inductance. We present an SQUID magnetometer fabricated with Nb/Al-AIO_x/Nb Josephson junction technology on a 4-inch silicon wafer at our superconducting electronics facilities. We develop a fabrication process based on selective niobium etching process consisting of five mask levels. In the first two mask levels, the trilayer is patterned by a dry etch to define base electrode, contact pads, and interconnects. The shunt resistor and a dielectric insulating layer are then deposited and patterned by using lift-off and dry etchant, respectively. Finally, the niobium wiring layer is deposited and patterned by using reactive ion etching to define input, pickup and feedback coils. The measurement of the SQUID magnetometer is performed inside a magnetically shielded room. The operating temperature is realized by immersing the SQUID into the liquid helium (4.2 K). Moreover, a superconducting niobium tube is employed to protect the SQUID from being disturbed by external environments. A homemade readout electronics instrument with low input voltage noise is used to characterize the SQUID magnetometer. The results of low-temperature measurements indicate that the magnetometer has a magnetic field sensitivity of 0.36 nT/ Φ_0 and a white flux noise of $8 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, corresponding to a white field noise of 2.88 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$. This kind of SQUID magnetometer is suitable for multi-channel systems, e.g., magnetocardiography, magnetoencephalography, etc. Although the SQUID process development benefits from the rapid advance of semiconductor process technology, the uniformity of the SQUID on one wafer is fluctuated due to the film deposition. Now, we have realized a best SQUID yield of 50% on a 4-inch wafer. In the future, the SQUID chip yield should be improved by well controlling the optimizing process. The device yield is expected to reach as high as 80%.

Keywords: superconducting quantum interference device, magnetometer, flux noise

PACS: 85.25.Dq, 07.55.Ge

DOI: 10.7498/aps.68.20190483

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