



串联超导量子干涉器件阵列制备与测试分析

梁恬恬 张国峰 伍文涛 倪志 王永良 应利良 伍俊 荣亮亮 彭炜 高波

Fabrication and experimental analysis of series superconducting quantum interference device array

Liang Tian-Tian Zhang Guo-Feng Wu Wen-Tao Ni Zhi Wang Yong-Liang Ying Li-Liang Wu Jun
Rong Liang-Liang Peng Wei Gao Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 178501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210467

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210467>

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>

二阶梯度交叉耦合超导量子干涉仪电流传感器研制

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

物理学报. 2021, 70(12): 128501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201816>

超导量子干涉器件

Superconducting quantum interference devices

物理学报. 2021, 70(1): 018502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202131>

MgO衬底上YBa₂Cu₃O₇台阶边沿型约瑟夫森结的制备及特性

Fabrication and characterization of YBa₂Cu₃O₇ step-edge Josephson junctions on MgO substrate for high-temperature superconducting quantum interference devices

物理学报. 2021, 70(3): 037401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201291>

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>

拓扑超导体FeSe_xTe_{1-x}单晶超导性能与磁通钉扎

Superconducting and flux pinning properties of FeSe_xTe_{1-x} topological superconductors

物理学报. 2020, 69(23): 237401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201125>

串联超导量子干涉器件阵列制备与测试分析*

梁恬恬¹⁾²⁾³⁾ 张国峰^{1)2)†} 伍文涛¹⁾²⁾ 倪志¹⁾²⁾³⁾ 王永良¹⁾²⁾ 应利良¹⁾²⁾
伍俊¹⁾²⁾ 荣亮亮¹⁾²⁾ 彭炜¹⁾²⁾³⁾ 高波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)

(2021 年 3 月 10 日收到; 2021 年 4 月 20 日收到修改稿)

串联超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 阵列通过增加 SQUID 数量来达到提升信噪比的目的, 即 SQUID 电压信号随 SQUID 数目比例增加而总电压噪声正比于 SQUID 数目的平方根值. 本文介绍了利用自主工艺线进行串联 SQUID 阵列研究的相关研究进展, 实现了 SQUID 数量分别为 200 和 800 的阵列集成, 测试得到磁通噪声达到 $0.5 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 和输入电流灵敏度 $35 \mu\text{A}/\Phi_0$, 等效输入电流噪声达到 $18 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. 另外, 还给出了阵列参数与集成 SQUID 数量的关系, 验证了设计可靠性和工艺一致性.

关键词: 超导量子干涉器件, 磁通噪声, 超导制备工艺

PACS: 85.25.Dq, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.70.20210467

1 引言

超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是一种融合了磁通量子化^[1,2]和约瑟夫森效应^[3,4]的量子器件, 也是迄今为止已知的最为灵敏的磁通传感器. 从结构上看, SQUID 是一个被约瑟夫森结隔断的超导环结构, 可以根据所含约瑟夫森结的数量, 分为单个结的交流 (rf)SQUID 和两个结的直流 (dc)SQUID 两种, 本文研究的是 dc SQUID (以下简称为 SQUID). 实际应用中, SQUID 需要偏置在一定的电流或电压下, 称为恒流或恒压偏置, 对应的 SQUID 输出电压或电流将随穿过 SQUID 环的变化磁通呈现类似余弦的周期调制信号, 其周期精确地等于一个磁通量子 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$). 由于 SQUID 磁

敏感特性是周期非线性的, SQUID 必须与读出电路配合工作在磁通锁定环 (flux-locked loop, FLL) 方式下才能构成磁传感器, 实现磁通-电压线性转换. 在 FLL 中, 除了 SQUID 的本征噪声外, FLL 的噪声主要来自读出电路的电压噪声 $\sqrt{S_V}$, 其贡献用磁通噪声来表征, 即 $\sqrt{S_\Phi} = \sqrt{S_V}/V_\Phi$, 其中 V_Φ 为 SQUID 工作点处磁通-电压转换系数, 决定于 SQUID 磁通-电压调制曲线的斜率. 可以看到, 为了获得最佳的磁通噪声, 通常要求 SQUID 工作点选择在 V_Φ 取得最大值处. 一般情况下, SQUID 动态电阻仅有几欧姆, 电压调制信号也只有几十微伏, 其噪声远低于室温半导体放大器的噪声, 造成 SQUID 应用中普遍存在的阻抗 (噪声) 匹配问题. 为了实现 SQUID 与读出电路前置放大器之间的噪声匹配, 读出电路已经先后发展了磁通调制^[5], 及应用直接读出的 APF^[6,7], NC^[8,9], DROS^[10,11],

* 上海市自然科学基金 (批准号: 18ZR1447400) 资助的课题.

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

SBC^[12] 等提高磁通-电压传输率抑制前置放大器噪声的方案.

串联 SQUID 阵列 (series SQUID array, SSA) 是将若干数量的 SQUID 串联起来以增大 SQUID 信号放大能力. 假设 N 个相同且彼此互相独立的 SQUID 串联组成 SSA, N 个 SQUID 输入磁通用同一组输入线圈来实现 (如图 1 所示). 假设阵列中的每个 SQUID 的电压噪声为 $V_1^2, V_2^2, \dots, V_N^2$, 它们相同且无关, 则可以取以上电压噪声都等于 V_n , 则阵列的总电压噪声为

$$\begin{aligned} V_{n,t} &= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_N^2} \\ &= \sqrt{N \cdot V_n^2} = \sqrt{N} \cdot V_n. \end{aligned} \quad (1)$$

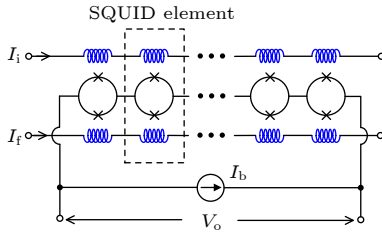


图 1 串联 SQUID 阵列 (SSA) 示意图. I_i 和 I_f 分别表示通过输入线圈和反馈线圈的电流, V_o 表示在偏置电流为 I_b 时 SSA 的输出电压

Fig. 1. Schematic diagram of series SQUID array (SSA). I_i and I_f represent the current through the input coil and feedback coil, respectively. V_o is the output voltage of SSA biased at the current I_b .

阵列中每个 SQUID 的输入信号都来自同一组输入线圈, 导致 SQUID 输出电压相关相加, 即总输出电压是所有 SQUID 输出电压之和, 相应地, SSA 的 V_Φ 提升 N 倍. 此时, SSA 的信噪比, 或者说磁通噪声可以表示为

$$\sqrt{S_{\Phi,t}} = \frac{V_{n,t}}{NV_\Phi} = \frac{\sqrt{N} \cdot V_n}{NV_\Phi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{S_\Phi}, \quad (2)$$

式中, $\sqrt{S_\Phi}$ 为单个 SQUID 的磁通噪声, 所以综合来看, SSA 的磁通噪声降低至单个 SQUID 的 $\frac{1}{\sqrt{N}}$, 或者说 SSA 信噪比提升 \sqrt{N} 倍^[13]. 相比单个 SQUID, SSA 整体上具有更高的增益和信噪比, 通常作为低温放大器实现与室温读出电路匹配, 用于其他低温探测器或 SQUID 信号的低噪声放大^[14,15], 构成低噪声双级联 (two-stage) 读出电路系统. 例如, Welty 和 Martinis^[16,17] 将 SSA 用于多级读出时, 可以有效地提高系统的输出电压, 简化室温电子电

路的结构. 另外, 在超导转变边沿探测器 (superconducting transition edge sensor, TES) 等低温探测器读出系统中, 特别是阵列型多通道系统中, 需要用到 SSA 的复用技术, 可以有效减少功率负载, 降低连线复杂度. 例如, Morooka 等^[18,19] 利用 128 个 SQUID 串联构成的 SSA 作为电流放大器来读取 TES 电流信号, 磁通噪声低至 $0.23 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, 等效电流噪声为 $1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. Lanting 等^[20] 在高带宽频分复用读出系统中, 采用 3 组 SSA 芯片互联构成一个共包含了 300 个 SQUID 的电流放大器, 输入电流噪声约为 $8.25 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, 实现了不低于 14 MHz 的闭环带宽.

本文主要介绍 SSA 的研制进展, 包括在设计中重点关注的阵列中单个 SQUID 之间的互扰表现^[21], 以及考虑到 SQUID 在实际应用环境中可能面临的磁场干扰而采取的梯度构型和滤波设计. 利用上海微系统所超导电子器件工艺平台, 设计制备了分别包含 200 和 800 个 SQUID 的 SSA, 初步验证了工艺可靠性和一致性. 利用自制读出电路对 SSA 进行了测试表征, 获得电流-电压特性曲线、磁通调制曲线等, 分析了以上特性参数与 SQUID 数量的关系. 在屏蔽室内, 实现了 SSA 测试磁通噪声低于 $0.5 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, 输入电流灵敏度 $35 \mu\text{A}/\Phi_0$, 等效输入电流噪声 $18 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$.

2 设计与制备

SQUID 本身是一种磁通敏感元件, 特别是在运动系统 (例如望远镜) 中, SQUID 在地球磁场中的运动造成的信号输出可以看作系统误差. 因此, 在 SSA 中, 我们采取了一阶梯度构型^[22], 即超导环路采用一组形状完全相同但是绕向相反的“8”字形垫圈结构, 这样对称的结构设计可以有效降低 SQUID 对地球磁场等匀强磁场的响应. 由于 SQUID 的紧密排布, 相邻 SQUID 超导环路之间的互感可能导致 SSA 的磁通相干性变差. 因此, SQUID 的垫圈形状呈扁宽型设计以等效拉宽单元间距. 在垫圈上可放置两组独立的耦合线圈, 作为输入线圈和反馈线圈, 分别用于信号输入和 FLL 电路. 图 2 给出了包含 800 个 SQUID 的 SSA 光镜图, 局部放大来看, 我们采用对称的设计结构, 有时候甚至使用冗余结构来保证阵列中的每个 SQUID 保持独立性.

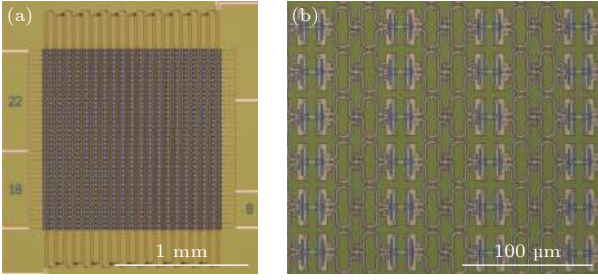


图 2 (a) SSA 光镜图; (b) SSA 局部放大图

Fig. 2. (a) Microscope photograph of global and (b) partial enlargement of SSA.

表 1 列出了 SSA 的设计参数. 其中, 约瑟夫森结面积为 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, 临界电流约为 $9 \mu\text{A}$. SQUID 垫圈的线宽缩减至 $2 \mu\text{m}$, 来抑制磁通钉扎效应^[23], 这样垫圈上方只允许放置一匝线宽为 $1 \mu\text{m}$ 的线圈, 为了进一步增强耦合强度, 增加另一匝线圈放置在垫圈外侧. 在这种设计下, 分别实现了 SQUID 电达到 100 pH 和线圈与 SQUID 之间的互感达到 60 pH .

表 1 SSA 设计参数
Table 1. Design parameters of SSA.

参数	符号	数值
约瑟夫森结面积/ $(\mu\text{m} \times \mu\text{m})$	A	3×3
临界电流/ μA	I_c	9
结并联电阻/ Ω	R_s	1和4
垫圈尺寸/ $(\mu\text{m} \times \mu\text{m})$	—	8×28
单个SQUID电感/ pH	L_S	100
输入线圈匝数/匝	—	2
输入线圈线宽/ μm	—	1
SQUID个数	N	200和800
输入电流灵敏度/ $(\mu\text{A} \cdot \Phi_0^{-1})$	$1/M_i$	35

SSA 的制备是基于原位磁控溅射生长的 Nb/Al-AlO_x/Nb 三层膜工艺, 配合反应离子刻蚀等技术实现超导微结构加工. 图 3 给出了 SSA 平面工艺截面示意图. 其中, 约瑟夫森结采用顶部开窗技术, 窗口尺寸为 $2 \mu\text{m}$. 约瑟夫森结并联电阻采用钛/钯 (Ti/Pd) 双层膜, 其中总膜厚为 40 nm , 可实现方块电阻值 $2 \Omega/\square$. 不同金属层间的绝缘层通过 SiO₂ 来实现. 在 SSA 中, 最小线宽结构为输入线圈, 线宽尺寸为 $1 \mu\text{m}$, 利用步进投影式光刻工艺 (i-line stepper) 来实现. 目前, SSA 的制备工艺可以在 4 英寸标准硅晶圆上实现, 工艺成品率在 80% 以上.

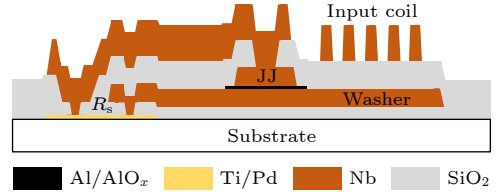


图 3 SSA 平面工艺截面示意图

Fig. 3. Cross section of SSA fabrication process.

3 测试与分析

在液氦温度下对 SSA 进行了测试. 其中, SSA 芯片固定在测试杆底部并外套铌筒以提供超导屏蔽, 将测试系统放置在由三层 μ 金属组成的磁屏蔽室内.

图 4 分别给出了包含 200 个 SQUID 的 SSA 电流-电压曲线和电压-线圈电流 (磁通) 调制曲线. 在图 4(a) 中, 三根曲线分别对应整数、半整数和四分之一磁通量子下的测试曲线, 从曲线上可以确定该 SSA 的临界电流为 $16 \mu\text{A}$ 和正常态电阻为 358Ω . SSA 随外磁通调制的曲线可以通过在恒定电流偏置下测试其两端电压来实现, 其中外磁通可以通过在

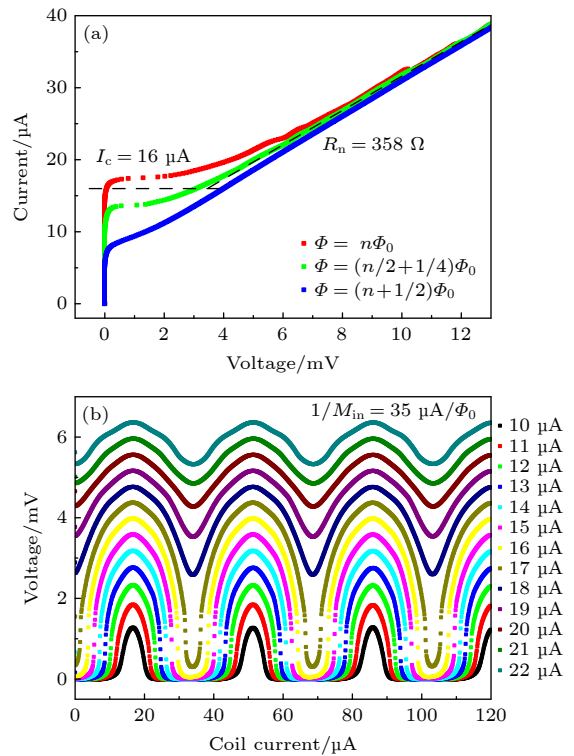


图 4 (a) SSA 电流-电压特性曲线; (b) SSA 在不同偏置电流下的电压-线圈电流 (磁通) 特性曲线

Fig. 4. (a) Current-voltage characteristic of SSA; (b) voltage-coil current (flux) characteristic at different bias currents of SSA.

输入线圈或反馈线圈施加扫描电流来实现. 图 4(b) 给出了在不同偏置电流情况下 SSA 电压随流过输入线圈中电流而变化的曲线, 曲线周期为 Φ_0 , 对应电流 $35 \mu\text{A}$, 即输入电流灵敏度为 $35 \mu\text{A}/\Phi_0$. 从图 4(b) 还可以看到, 在偏置电流为 $17 \mu\text{A}$ 时, SSA 最大调制幅度可达到 4 mV 左右, 并且在最佳工作点处 V_Φ 约为 $36 \text{ mV}/\Phi_0$.

由于具有较大的 V_Φ , 可以有效地降低来自室温放大器的噪声, 直接将 SSA 与读出电路相连. 图 5 所示的是在磁屏蔽室内测试得到的 SSA 磁通噪声曲线. 可以看到, 在低频段 ($< 1 \text{ kHz}$), 噪声随着频率降低而升高, 呈现 $1/f^\alpha$ 特点, $\alpha = 0.3$. 该噪声的主要影响因素来自于测试环境噪声干扰, 这提示我们在对 SQUID 等量子器件进行测试时应加强对外界干扰的屏蔽. 在白噪声段 (1 kHz 以上), SSA 最佳磁通噪声可低至 $0.5 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$. 在这里, 室温放大器电压噪声约 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 等效为磁通噪声约为 $0.03 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, 即此时可认为来自室温放大器的噪声贡献可以忽略不计. 但是, 该测量磁通噪声仍然要比文献报道的数值要高. 我们分析, 该阵列设计中的 SQUID 并没有完全做到互不相关, 导致噪声高于理论预期. 利用上面得到的输入电流灵敏度, 可以计算 SSA 等效电流噪声为 $18 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$.

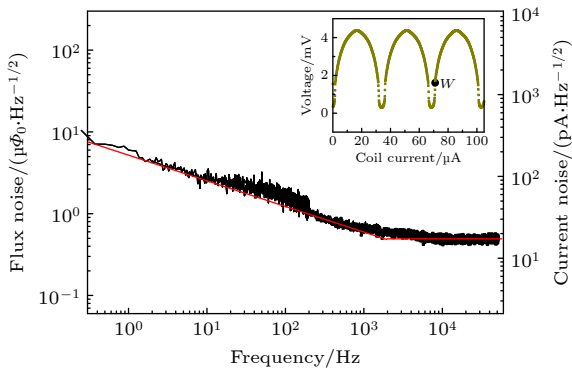


图 5 SSA 磁通噪声曲线和等效电流噪声
Fig. 5. Flux noise curve and equivalent current noise of SSA.

为了研究 SSA 与 SQUID 数量的关系, 在 200 个 SQUID 基础上, 增加 SQUID 数量达到 800, 并可以抽出不同数目的 SQUID 构成小的 SSA, 由此来验证器件性能与串联个数之间的关系. 将 SSA 的正常态电阻 R_n 、最大电压调制幅度 V_{pp} 和最大 V_Φ 与 SQUID 数量的关系汇总到图 6 中. 从线性拟合结果看, 以上参数与 SQUID 的数量呈现较好的线性关系, 这也说明了 SSA 设计中的 SQUID 之

间保持了一定的独立性, 没有因串扰或设计缺陷造成 SSA 性能恶化 [21]. 同时, 也说明了我们的制备工艺保持了很好的稳定性和一致性. 但是, 通过对 SQUID 数量从 20 到 200 不等的 SSA 的噪声测试来看, 虽然随着 SQUID 数量的增加, SSA 的磁通噪声呈下降趋势, 但仍然未达到理论值. 也就是说, SSA 中的 SQUID 还没有达到理想的非相关. 这启示我们, 现有的 SSA 设计和测试系统仍然有优化的空间, 同时可以进一步提升输入电流灵敏度, 以获得更低的输入电流噪声水平.

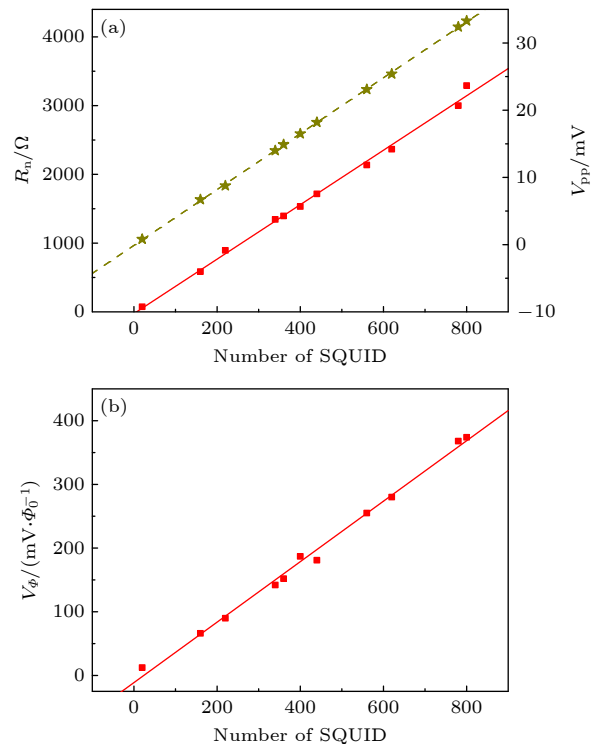


图 6 (a) SSA 的正常态电阻 R_n (方点) 和最大电压调制幅度 V_{pp} (星点) 与 SQUID 数量之间的关系, 实线和虚线均为测试数据的线性拟合; (b) SSA 的最大磁通-电压转换系数 V_Φ 与 SQUID 数量之间的关系, 其中点为测试值, 线为线性拟合的结果

Fig. 6. (a) Normal resistance R_n (square dot) and maximum voltage swing V_{pp} (star dot) of SSA dependence on the SQUID-element number, in which the solid and dashed line are linear fittings, respectively (b) maximum flux-to-voltage coefficient V_Φ dependence on the SQUID-element number, where the dots are experimental data and the line is the result of linear fitting.

4 结 论

本文介绍了具有较大集成规模的串联 SQUID 阵列的研究进展, 集成数量分别达到 200 和 800. 在 SQUID 阵列中, 采用了一阶梯度构型来降低外

场的共模干扰. 在磁屏蔽室内, 测试得到阵列的相关特性曲线, 实现磁通-电压转换系数达到 $36 \text{ mV}/\sqrt{\Phi_0}$, 利用直读电路测得磁通噪声低至 $0.5 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, 以及 $35 \mu\text{A}/\Phi_0$ 的输入电流灵敏度, 等效输入电流噪声达到 $18 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. 串联 SQUID 阵列的成功制备验证了自主工艺线的工艺稳定性和一致性, 为低噪声放大器和 TES 等低阻探测器的复用读出奠定了基础.

参考文献

- [1] Deaver B S, Fairbank W M 1961 *Phys. Rev. Lett.* **7** 4
- [2] Doll R, Näbauer M 1961 *Phys. Rev. Lett.* **7** 51
- [3] Josephson B D 1962 *Phys. Lett.* **1** 251
- [4] Josephson B D 1965 *Adv. Phys.* **14** 419
- [5] Forgacs R L, Warnick A 1967 *Rev. Sci. Instrum.* **38** 214
- [6] Drung D, Cantor R, Peters M, Scheer H J, Koch H 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 406
- [7] Wang Y, Zhang G, Zhang S, Rong L, Xie X 2020 *Physica C* **569** 1353590
- [8] Seppä H, Ahonen A, Knuutila J, Simola J, Vikman V 1991 *IEEE Trans. Magn.* **27** 2488
- [9] Drung D 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 065006
- [10] Adelerhof D J, Kawai J, Uehara G, Kado H 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 2606
- [11] Kang C S, Kim K, Lee S J, Hwang S M, Kim J M, Yu K K, Kwon H, Lee S K, Lee Y H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 053906
- [12] Xie X, Zhang Y, Wang H, Wang Y, Mück M, Dong H, Krause H J, Braginski A I, Offenhäusser A, Jiang M 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 065016
- [13] Kazami K, Kawai J, Uehara G, Kado H 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 4322
- [14] Falferi P, Mezzena R, Vinante A 2009 *Supercond. Sci. Technol.* **22** 075020
- [15] Kiviranta M, Gronberg L, Sipola H 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 045003
- [16] Welty R P, Martinis J M 1991 *IEEE Trans. Magn.* **27** 2924
- [17] Welty R P, Martinis J M 1993 *IEEE Trans. Magn.* **3** 2605
- [18] Morooka T, Myoren H, Takada S, Chinone K 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 1375
- [19] Morooka T, Tanaka K, Chinone K 2002 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **12** 1866
- [20] Lanting T, Dobbs M, Spieler H, Lee A T, Yamamoto Y 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 094501
- [21] Li K, Hubbell S P 1995 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** 3255
- [22] Stawiasz K G, Ketchen M B 1993 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** 1808
- [23] Semenov V K, Khapaev M M 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 1300710

Fabrication and experimental analysis of series superconducting quantum interference device array^{*}

Liang Tian-Tian¹⁾²⁾³⁾ Zhang Guo-Feng^{1)2)†} Wu Wen-Tao¹⁾²⁾ Ni Zhi¹⁾²⁾³⁾
 Wang Yong-Liang¹⁾²⁾ Ying Li-Liang¹⁾²⁾ Wu Jun¹⁾²⁾ Rong Liang-Liang¹⁾²⁾
 Peng Wei¹⁾²⁾³⁾ Gao Bo¹⁾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) (*Center for Excellence in Superconducting Electronics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

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

(Received 10 March 2021; revised manuscript received 20 April 2021)

Abstract

Superconducting quantum interference device (SQUID) has been used as an extremely sensitive flux sensor up to now. Series SQUID array (SSA) is made up of several identical element-SQUIDs in series, in which each element-SQUID is coupled with the same set of input coils by mutual inductance to realize the amplified output of the input current. From the noise viewpoint, each element-SQUID in SSA is independent of each other, resulting in the total voltage noise across the array rising linearly with the square root of the number of element-SQUIDs. From the perspective of input signals, since the signals come from the same set of input coils, the voltage output of the array is enlarged with the proportion of element-SQUID number, N . Taken together, the signal-to-noise ratio of SSA is increased by \sqrt{N} times, or the flux noise of SSA is reduced by $1/\sqrt{N}$ times compared with that of an element-SQUID ideally. However, with the increase in the number of element-SQUIDs in series, the chip design of SSA becomes more complicated, which puts forward higher requirements for the consistency and stability of its fabrication process. Besides, there exists a certain flux coherence between element-SQUIDs in SSA, whose normal operation depends on the working state of each element-SQUID in the array. In this paper, the fabrication of series SQUID array is carried on the autonomous superconducting micro-nano process platform, with a yield rate reaching over 80% on a 4-inch standard silicon wafer. Two kinds of SSAs with 200 and 800 element-SQUIDs, respectively, are integrated in a meandering way on a chip in a millimeter area. Home-made directly-coupled readout circuit is used to obtain the characteristics of SSA. The experimental results reveal that the flux noise at best working point is as low as $0.5\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ and the current sensitivity is about $35\mu\text{A}/\Phi_0$, thus, the equivalent input current noise is achieved at a level of $18\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. Additionally, the dependence of relevant parameters in array on the number of element-SQUIDs is verified, which is consistent with theoretical expectation basically. These show that the reliability of device design and the consistency of fabrication process perform well, thus laying the technical foundation for developing the low-noise SQUID amplifier and the multiplexed readout of low-impedance detectors.

Keywords: superconducting quantum interference device, flux noise, superconducting fabrication process

PACS: 85.25.Dq, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.70.20210467

^{*} Project sponsored by the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 18ZR1447400).

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