

应用于超导脑磁系统的集成超导量子干涉器件芯片的设计与性能评估*

李加林¹⁾²⁾³⁾ 张国峰^{2)3)4)†} 李思瑶²⁾³⁾⁵⁾ 王甜璐²⁾³⁾ 魏雪齐²⁾³⁾⁴⁾
李华²⁾³⁾⁴⁾ 古元冬¹⁾ 孙立敏^{2)3)4)5)‡}

1) (上海大学微电子学院, 上海 201800)

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, 北京 100049)

5) (中国医科大学智能医学学院, 沈阳 110122)

(2025 年 4 月 2 日收到; 2025 年 7 月 15 日收到修改稿)

超导量子干涉器件 (SQUID) 作为一种超灵敏的磁通传感器, 在生物磁探测、低场核磁共振、地球物理探测等领域得到广泛应用. 本文设计开发了一种用于脑磁 (MEG) 系统的集成 SQUID 芯片, 并进行了批量封装测试. 其中, 每个芯片上集成了两个一阶平面梯度计和一个磁强计, 采用亚微米约瑟夫森结制备技术, 实现 $0.7\ \mu\text{m} \times 0.7\ \mu\text{m}$ 的亚微米结尺寸. SQUID 与探测线圈采用 Nb 超导引线连接, 集成到同一芯片上. 对 171 个 SQUID 器件的测试结果显示, 这些器件在磁场白噪声、 I - V 特性、 V - Φ 特性等方面表现优异. 本文制备的 SQUID 器件工作电流集中在 15 — $20\ \mu\text{A}$, 电压摆幅集中在 80 — $120\ \mu\text{V}$. 此外, 超过 80% 的 SQUID 器件的磁场白噪声低于 $5\ \text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 能够满足多通道 SQUID 脑磁系统的要求.

关键词: 超导量子干涉器件, 磁强计, 梯度计, 磁场噪声

PACS: 85.25.Dq, 07.55.Ge

DOI: 10.7498/aps.74.20250426

CSTR: 32037.14.aps.74.20250426

1 引言

超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是目前已知最灵敏的磁通量子传感器之一, 具备频带宽、动态范围大和线性度高等特性, 能探测极其微弱的磁场信号. 因此, 它在生物磁探测^[1-3]、地磁场探测^[4,5]、无损检测^[6]、SQUID 扫描电子显微镜^[7,8] 等多个领域得到了广泛应用. 目前已有多种 SQUID 芯片, 包括低温超导 SQUID (LTc SQUID)^[9]、高温超导 SQUID (HTc

SQUID)^[10-12] 和纳米 SQUID (Nano SQUID)^[13,14]. 相比于工作在 $77\ \text{K}$ 左右液氮温度下的高温超导 SQUID, 以及常用于对单个量子比特或纳米尺度磁性结构探测的纳米 SQUID, 低温超导 SQUID (液氮温度约为 $4\ \text{K}$) 在极弱生物磁检测方面优势明显.

SQUID 的关键结构是约瑟夫森结. 约瑟夫森结的质量决定了 SQUID 的性能, 目前主流的结构是 Nb/Al-AlO_x/Nb 结构, 这种结构具有较高的电压-磁通转换系数, 较宽的临界电流范围. STAR 公司开发的选择性铌阳极氧化工艺 (selective niobium

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF1202800) 和国家人才创新类项目 (批准号: E28JRA1) 资助的课题.

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

‡ 通信作者. E-mail: limin.sun@mail.sim.ac.cn

anodization process, SNAP) 制造工艺通过多层膜沉积与图形化工艺结合, 实现了磁通噪声低至 $3-4 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 的 DC SQUID 器件^[15]. 该技术采用 Nb/Al-AIO_x/Nb 三层膜结构, 通过阳极氧化定义结区并配合反应离子刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 完成配线层集成, 成功应用于心磁成像系统. 为进一步优化器件性能, 应利良团队^[16] 在 SNAP 基础上发展出选择性铌蚀刻工艺 (selective niobium etching process, SNEP), 通过光刻定位结区后依次刻蚀铌膜与 Al-AIO_x 层, 结合 SiO₂ 绝缘层沉积和 Nb 接触布线层集成, 使 SQUID 磁场白噪声降至 $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下, 验证了该工艺对结区界面特性的有效控制. 与此同时, Schmelz 等^[17] 提出了十字型约瑟夫森结技术, 通过亚微米结制备 ($0.8 \mu\text{m}$) 与薄膜输入线圈集成, 将 SQUID 电压摆幅提升至 $100-150 \mu\text{V}$, 磁通噪声降低至 $1 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$. 由于约瑟夫森结的结电容会影响 SQUID 的性能^[18], 因此通过缩减结的尺寸来减小结电容. Storm 等^[19] 提出了一种基于 HfTi 自分流结技术的改进工艺. 采用电子束光刻 (electron beam lithography, EBL) 与化学机械抛光 (chemical mechanical polishing, CMP) 技术制备亚微米约瑟夫森结, 制备出 0.8 和 $0.7 \mu\text{m}$ 亚微米结, 结电容降低至 40 fF . SQUID 的白噪声能量灵敏度从 $4.7h$ 显著降低至 $0.65h$, 实现了低于 $180 \text{ aT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 磁场噪声. 张国峰等^[20] 开发了一种交叉线工艺, 采用 i-line 步进光刻技术与 RIE, 通过阶梯侧壁结构与过刻蚀效应制备出 $0.7 \mu\text{m} \times 0.35 \mu\text{m}$ 亚微米结, 通过缩小结面积, 结电容显著降低. 该工艺在实验室环境下实现了亚微米约瑟夫森结的晶圆级制备, 验证了其规模化生产的可行性.

本文提出一种基于亚微米结技术的分离式 SQUID 制备方法, 采用嵌入式大线圈设计, 并将分离式 SQUID 与探测线圈集成封装. 为了评估该方法的性能, 对芯片进行了包括 $I-V$ 特性、电压摆幅以及噪声的测试, 并对测试结果进行了数据归纳和分析. 通过大规模测试, 结果表明其能够满足多通道 SQUID 脑磁系统对高精度和低噪声的要求.

2 SQUID 芯片设计与封装

2.1 芯片设计

SQUID 是一种磁通-电压转换器件, 结构上由超导环和嵌入环内的约瑟夫森结组成, 其中根据约

瑟夫森结的数量可以分为直流 SQUID 和交流 (射频) SQUID^[21]. 文中所述 SQUID 为直流 SQUID. SQUID 中的超导环将环内变化磁场转化为磁通, 通过约瑟夫森结的临界电流受磁通周期性调制, 当偏置电流在临界电流附近时, 磁通变化被转换为电压变化, 从而实现磁场到电压的转换. SQUID 的磁场灵敏度与超导环的面积成正比, 即面积越大, 磁场灵敏度越大, 但是环路电感也因此增加. 受限于 SQUID 屏蔽参数 β_L , 环路电感不能够做得无限大, 因此需引入磁通变压器优化灵敏度. 磁通变压器是由输入线圈和探测线圈组成的超导回路. 其中, 探测线圈面积较大, 外部变化磁场在线圈内引起感应电流变化, 该电流再通过输入线圈变为磁通以互感的方式耦合到 SQUID 环路中. 所以输入线圈通常采用多匝螺旋线圈的方式实现与 SQUID 的有效耦合. 商用的一种典型的 MEG 芯片集成了三个 SQUID 传感器, 包括两个一阶平面梯度计 (gradiometer, GRA) 和一个磁强计 (magnetometer, MAG)^[22]. 由于 MEG 系统通道数量较多, 对磁场传感器的灵敏度、一致性及系统集成度提出了更高要求. 为实现高密度多通道系统集成, 同时兼顾制造可控性与磁性能优化, 我们在芯片设计中采用 SQUID 与探测线圈分离并集成的结构方案. SQUID 部分结构统一、参数一致, 可实现标准化制备与大规模复制. 而探测线圈则根据功能需求可将磁强计设计为磁线圈 (0 阶) 结构, 梯度计设计为一阶梯度线圈或更高阶梯度线圈等形式, 并通过超导引线与 SQUID 进行磁通耦合. 这种设计方式不仅提升了系统的一致性与灵活性, 也便于后期测试、维护及拓展, 有助于实现大规模、低噪声、高可靠性的脑磁信号采集系统. 由于脑磁信号强度通常在百飞特斯拉 (fT) 量级, 这决定了探测线圈的尺度要达到厘米量级才能达到探测所需的灵敏度. 而 SQUID 受自身电感限制, 其尺度通常在百微米量级, 而约瑟夫森结等关键部件的尺寸更是仅有亚微米尺度. 考虑到工艺能力和晶圆制备需求, 采用分立集成方式, 即将 SQUID 和探测线圈分别在不同晶圆上进行制备, 再进行组合集成的方式. 图 1 分别显示了 SQUID 和探测线圈的晶圆集成示意图. 图 1(a) 中 SQUID 部分包含磁强计与电流计. 图 1(b) 中蓝色为磁强计线圈, 红色和黑色为一阶梯度计线圈, 基线长度约为 1.4 cm . 这些线圈分别与 SQUID 之间通过超导键合线实现超导连接. 探测线圈与三个电流计组合形成一个 SQUID 脑磁芯片.

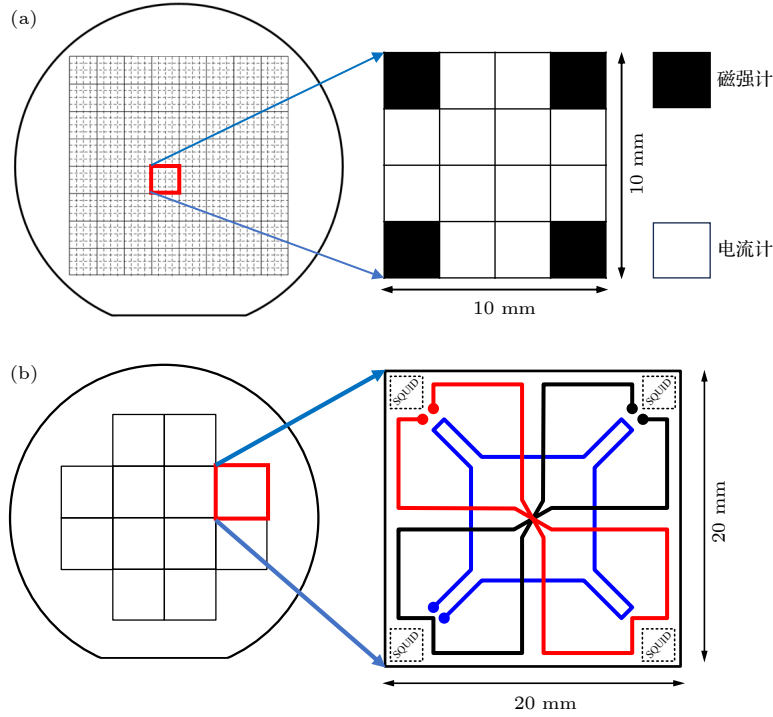


图 1 (a) SQUID 晶圆集成示意图; (b) 探测线圈晶圆集成示意图
Fig. 1. (a) Wafer of SQUIDs; (b) the wafer of pickup coils.

SQUID 部分由约瑟夫森结、超导环和输入线圈组成. 约瑟夫森结采用超导-绝缘-超导 (SIS) 隧道结结构, 结尺寸为 $0.7 \mu\text{m} \times 0.7 \mu\text{m}$, 与传统微米级约瑟夫森结相比, 由于结面积大幅减小, 结电容仅有 0.05 pF , 根据 Steward-McCumber 参数, 结并联电阻 R_s 可以增加至 35Ω . 超导环采用垫圈结构, 构型为一阶梯度, 可以有效地降低较强的背景

磁场的干扰, 此时的 SQUID 总电感为两个串联电感之和. 输入线圈分为两部分, 分别置于两个串联电感结构之上, 采用多匝螺旋结构, 匝数相同但是绕向相反, 以实现与 SQUID 间的互感耦合. 详细的 SQUID 设计参数见表 1.

探测线圈设计为单匝磁场线圈和平面一阶梯度结构, 分别实现对磁场 B_z 和梯度磁场分量 G_{zx} , G_{zy} 的探测, 结果如图 1 所示. 探测线圈通过对超导薄膜进行光刻刻蚀工艺得到窄带线条来实现, 其整体几何尺寸与磁场探测灵敏度 (或有效面积) 有关, 而线条宽度决定了探测线圈的电感. 为了实现最大的磁通转换效率, 通常要求探测线圈电感与输入线圈电感相等, 在综合考虑灵敏度以及电感匹配要求下, 探测线圈的设计参数如表 2 所列.

表 1 SQUID 设计参数

Table 1. Parameters for designing a SQUID.

SQUID结构	参数	数值	单位
约瑟夫森结	尺寸	0.7×0.7	μm^2
	临界电流密度	2	kA/cm^2
	临界电流	10	μA
	结电容	0.03	pF
	结电阻	35	Ω
	β_c	1	—
环电感	环结构	1st order gradiometer	—
	内边长	20	μm
	线宽	84	μm
	单loop电感	56	pH
	Input线宽	2	μm
	Input线距	2	μm
	Input匝数	18×2	—
Input电感	36	nH	

表 2 探测线圈设计参数

Table 2. Parameters for designing a pickup coil.

器件类型	参数	数值	单位
磁强计	Pickup内边长	7000	mm
	Pickup线宽	500	μm
	Pickup电感	19	nH
梯度计	Pickup内边长	8000	mm
	Pickup线宽	500	μm
	Pickup电感	45	nH

2.2 芯片制备与封装

SQUID 芯片的制备是在商用硅衬底上, 通过薄膜生长、光刻刻蚀等微纳加工技术来实现^[23]. 在 SQUID 制备中, 由于约瑟夫森结设计尺寸为 $0.7\ \mu\text{m} \times 0.7\ \mu\text{m}$, 采用亚微米约瑟夫森结制备技术, 即利用两条十字交叉型亚微米条带来实现^[20]. 由于 SQUID 芯片尺寸为 $2.5\ \text{mm} \times 2.5\ \text{mm}$, 因此在 4 in 晶圆上可以实现千片级集成. 但是针对探测线圈这种大尺度结构 ($20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$), 4 in 晶圆上仅可以实现 12 片集成.

在实际 MEG 应用中, SQUID 与探测线圈组

合形成磁强计或梯度计. SQUID 输入线圈和探测线圈的电极利用引线键合的方式进行连接. 为了实现输入线圈和探测线圈之间的磁通变压器功能, 利用退火处理的铌线将输入线圈和探测线圈的电极进行键合连接, 同时可以避免因接触电阻引入的额外噪声干扰. 图 2(a) 显示 SQUID 与探测线圈之间的键合实物照片. 磁强计或梯度计整体固定于一块低温 PCB 板, 板上集成了信号输出和控制引线, 通过铝线或金线键合实现与芯片之间的电气连接. 图 2(b) 显示了封装之后的单元脑磁芯片模块照片, 作为多通道脑磁探测系统中的一个传感器单元.

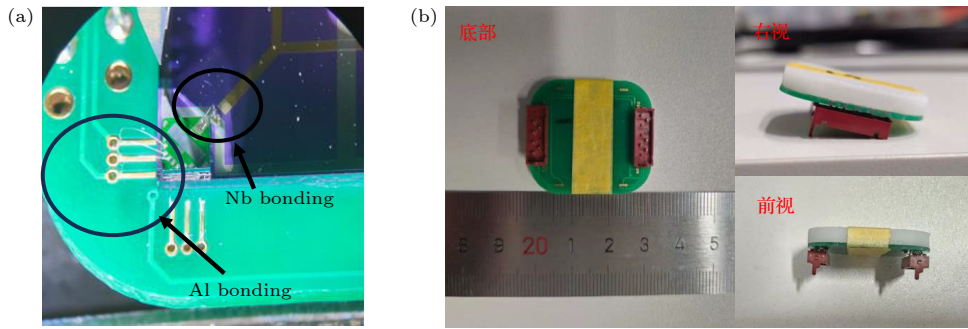


图 2 SQUID 芯片封装示意图 (a) 引线键合; (b) SQUID 封装成品图
Fig. 2. SQUID chip packaging; (a) The lead bonding; (b) the final SQUID packaging.

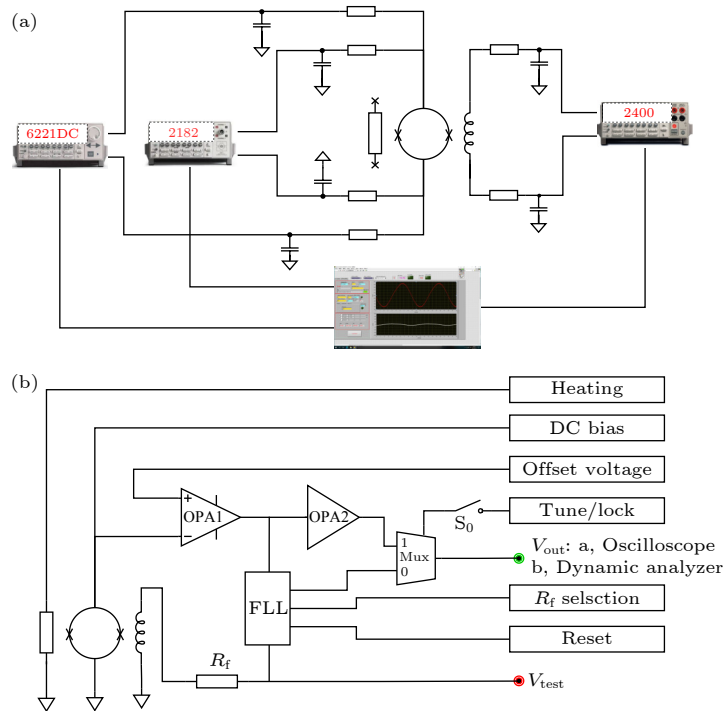


图 3 测试电路框图 (a) I - V 特性、 V - Φ 特性测试框图; (b) 噪声测试框图

Fig. 3. Block diagrams of the test circuits: (a) Block diagram for I - V and V - Φ characteristic measurements; (b) block diagram for noise measurement.

2.3 器件性能表征及测量方法

在小电流范围内, SQUID 的电压通常保持在零附近. 当电流接近临界值时, 超导体从超导状态转变为正常导电状态, 通常伴随着电压的显著增加并且随着电流的增加, 电阻趋近于一个常数. 电压-磁通 ($V-\Phi$) 曲线反映了 SQUID 对外部磁通变化的稳定响应. 每个调制周期对应一个 Φ_0 , 在不同的磁通量输入下表现一致. 电压波动幅值反映了 SQUID 的分辨率和灵敏度, 电压波动幅值越大, 表明 SQUID 对磁通量变化的分辨率和灵敏度越高, 可以准确地捕捉微小的磁场变化. 图 3(a) 是 $I-V$ 特性和 $V-\Phi$ 特性曲线的测试框图. Keithley 系列源表 (Tektronix Inc, Johnston, Ohio, USA) 用于提供偏置信号和进行电压采集. 图 3(b) 为噪声测试框图, 读出电路与杜瓦瓶和 SQUID 一起置于屏蔽室内, 测试仪器放置在屏蔽室外. 在 SQUID 锁定状态下, 测量电压磁通转换系数 $\partial V/\partial\Phi$, 使用 Agilent 35670A 动态分析仪 (Agilent Technologies, Santa Clara, California, USA) 读出电压噪声, 即 $S_v(f)$. SQUID 的磁通噪声计算公式为

$$S_\Phi(f) = \frac{S_v(f)}{\partial V/\partial\Phi}. \quad (1)$$

检测线圈的有效面积 A_{eff} 和 SQUID 磁通噪声共同决定 SQUID 磁场噪声, 表达式为

$$S_B(f) = \frac{S_\Phi(f)}{A_{\text{eff}}} = S_\Phi(f) \times B_\Phi, \quad (2)$$

式中, B_Φ 为磁场-磁通转换系数, 用来衡量器件将外磁场转化为磁通的能力. 本文所制备的梯度计和磁强计的 B_Φ 分别为 $1.25 \text{ nT}/\Phi_0$ 和 $1 \text{ nT}/\Phi_0$. 为统一单位, 本文所有噪声谱均以磁场噪声 ($\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$) 表示. 图 4 展示了磁强计与梯度计的测量结果, 其中磁强计输出为实际磁场噪声, 梯度计则表示为等效磁场噪声, 除以基线长度则可得到实际梯度噪声 ($\text{T}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$).

3 结果

3.1 不同环境下的芯片磁场噪声对比

为了系统地评估磁屏蔽室的屏蔽效能及环境噪声对 SQUID 器件性能的影响, 通过 SQUID 在不同环境条件下采集环境磁场噪声进行分析. 由于探测线圈的大尺寸特性, 其在屏蔽室外易受环境磁场干扰, 导致信号难以稳定锁定和采集噪声, 因此

噪声测试均在屏蔽室内部进行. 屏蔽效果通过比较屏蔽室门开启与关闭状态下的噪声谱来评估. 图 4 展示了两个梯度计和一个磁强计在上述环境条件下的磁场噪声频谱, 其中低频段 (0—400 Hz) 与高频段 (400—13.8 kHz) 分段测试. 结果表明, 屏蔽室门关闭状态下, 磁场噪声水平显著降低且频谱稳定性提升; 而门在打开状态下, 低频段噪声明显增加且波动较大, 反映环境磁场干扰增强. 上述结果证明本研究所用磁屏蔽室具有优良的屏蔽性能, 能有效地抑制环境磁场干扰.

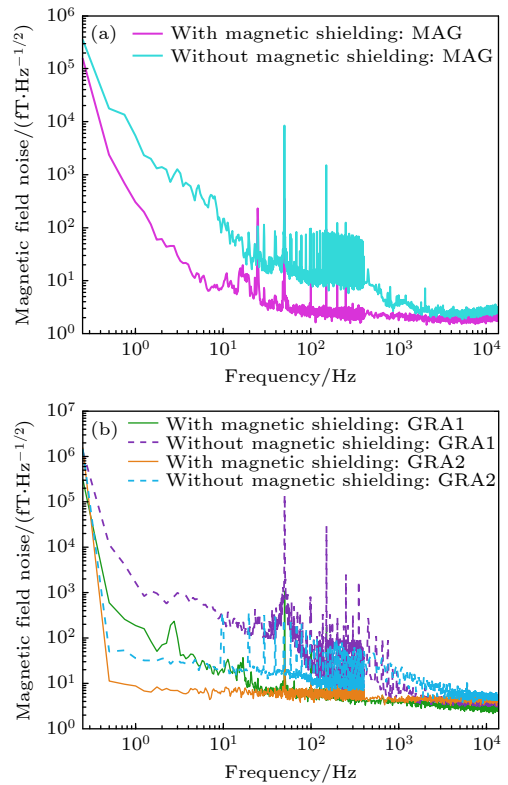


图 4 (a) 磁强计在不同环境中的磁场噪声谱; (b) 梯度计在不同环境中的磁场噪声谱

Fig. 4. (a) Magnetic field noise spectrum diagrams of MAG in different environments; (b) magnetic field noise spectrum diagrams of GRA in different environments.

3.2 单元脑磁芯片的性能分析

为了评估晶圆上器件参数的均匀性, 随机筛选了 171 个芯片进行封装测试, 获得了 171 组 $I-V$ 特性和 $V-\Phi$ 特性数据. 其中存在 4 组噪声值 (分别为 109, 16, 16 和 15 $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$) 明显偏离整体均值, 疑似异常值, 故未纳入统计分析. 最终, 采用了 167 个噪声数据进行统计, 以保证结果的代表性和准确性. 由于磁强计和梯度计在设计和功能上的差异, 我们将两者分开进行统计分析.

图 5(a) 展示了一个磁强计和两个梯度计的磁场噪声与磁通噪声曲线特性. 可以看到, 器件白磁通噪声低于 $5 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$. 虚线代表磁场噪声, 磁强计的磁场白噪声分别为 $1.56 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、梯度计的磁场白噪声为 4.02 和 $1.81 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. 图 5(b) 为磁强计与梯度计 I - V 特性曲线. 图中的实线和虚线分别对应施加的磁通量为 $n\Phi_0$ 和 $(n + 0.5)\Phi_0$. 当偏

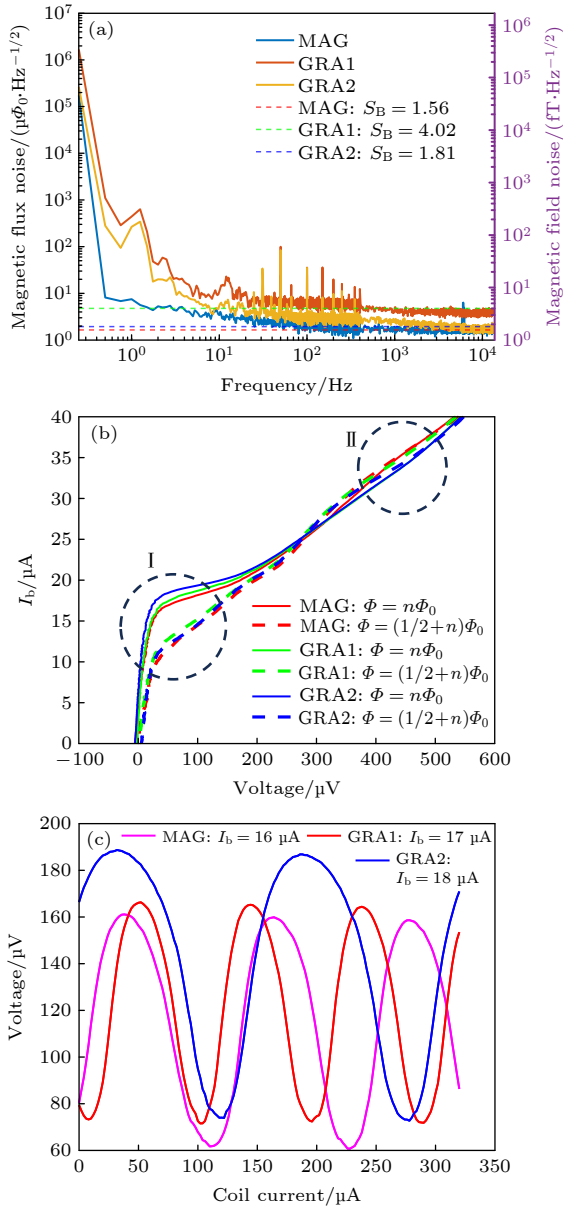


图 5 单元脑磁 SQUID 芯片的参数特性曲线 (a) 磁强计与梯度计磁场与磁通噪声图; (b) 磁强计与梯度计的 I - V 特性曲线; (c) 磁强计与梯度计的最大电压摆幅特性曲线

Fig. 5. Parametric characteristic curves of single MEG SQUID chip: (a) Magnetic fields and flux noises of MAG and GRA; (a) the I - V characteristic curves of MAG and GRA; (c) the maximum voltage swing characteristic curves of MAG and GRA.

置电流达到约 $26 \mu\text{A}$ 时, 不同磁通对应的 I - V 曲线存在交叉现象, 这是由 SQUID 垫圈电感 L_s 与结电容 C 之间的 LC 共振效应引起的. 随着 β_L 的增大, 该共振效应变得更加显著, 电感 L_s 越大, 共振效应越强, 曲线交点出现得越早. 并联电阻 R_s 可以在一定程度上抑制 LC 共振效应^[24], 但随着 R_s 的增加, 抑制效应逐渐减弱. 由于不同 SQUID 设计的 LC 共振电路具有不同的共振频率, R_s 对共振抑制的影响也有所不同, 这对 R_s 的增大设置了限制, 同时也意味着回滞参数 β_c 不能过大, 否则会产生回滞曲线. 图 5(b) 中的区域 II 的 V - Φ 曲线峰值较低, 在后续测试与实际应用中选择 V - Φ 曲线峰值较高的区域 I 作为工作区. 图 5(c) 为三个通道最大电压摆幅曲线, 梯度计最大调制幅度达到了 $114 \mu\text{V}$ 和 $93 \mu\text{V}$, 磁强计最大调制摆幅达到了 $99 \mu\text{V}$. 且都具有较大的电流-磁通转换系数 ($\frac{\partial V}{\partial \Phi} \times \frac{1}{R_f}$, R_f 为反馈电阻). 尽管三个 SQUID 芯片参数一致, 但其与不同线圈结构的电感失配导致两者电压摆幅曲线产生分化.

3.3 磁强计与梯度计的 I_c 统计

图 6 展示了磁强计与梯度计在外部磁通分别为整数倍磁通量子 ($\Phi = n\Phi_0$) 及半整数倍磁通量子 ($\Phi = (n + 0.5)\Phi_0$) 条件下的临界电流 (I_c) 统计分布. 由于 SQUID 的量子干涉效应, 其临界电流对磁通周期具有高度敏感性: 当 $\Phi = n\Phi_0$ 时, 超导环内量子化相位差为零, 导致干涉相长, I_c 达到极大值; 而在 $\Phi = (n + 0.5)\Phi_0$ 时, 相位差为 π , 干涉相消使 I_c 显著降低. 对比图 6(a) 和图 6(c) 可以看出, 磁强计和梯度计在不同外加磁场条件下的 I_c 分布整体上存在一定规律性, 反映出磁通调制对 I_c 具有直接影响. 从单个器件的角度来看, I_c 的数值分布较为分散, 表明器件间存在一定的不均匀性. 这种离散性来源于制造工艺的偏差, 例如超导层厚度的微小变化和刻蚀精度的限制. 此外, 探测线圈与 SQUID 的磁通耦合效率、寄生电感的影响等因素也会导致不同器件的 I_c 差异. 为达到优化器件制备一致性的目的, 可以通过提升制造工艺精度、优化拾取线圈设计以增强磁通耦合, 并在测试阶段引入更精确的补偿策略等手段, 以减少外界磁场对器件性能的影响.

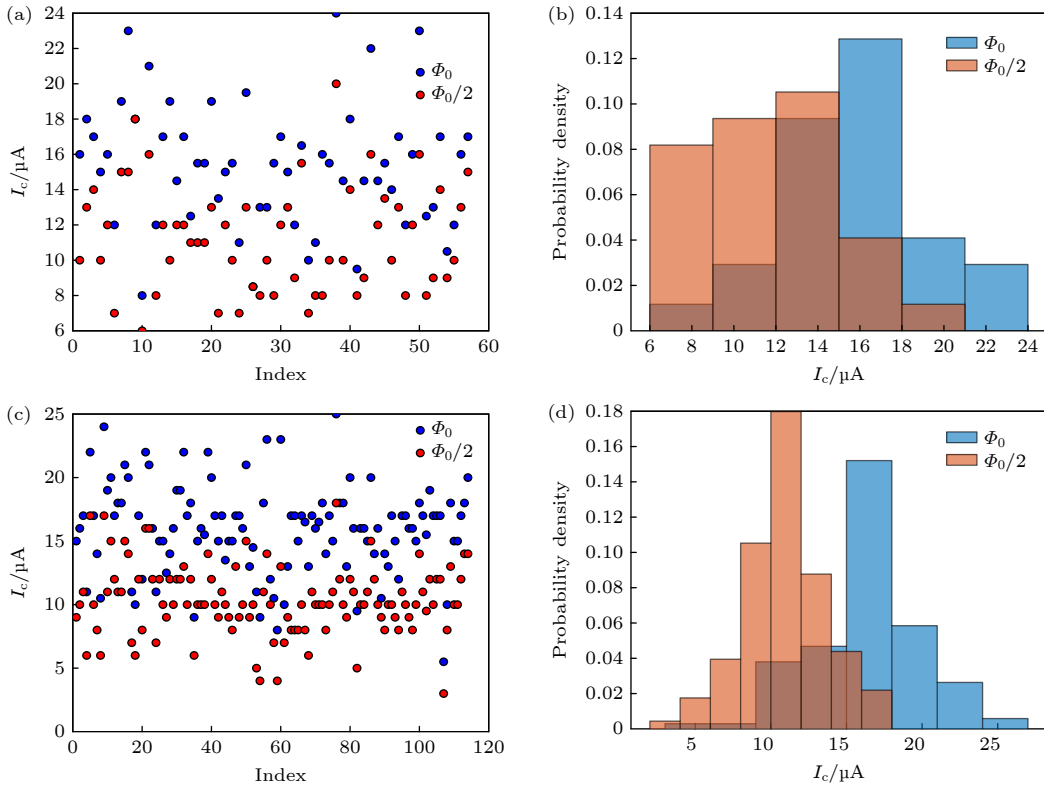


图 6 磁强计与梯度计不同外加磁场的 I_c 分布 (a) 磁强计 I_c 散点图; (b) 磁强计直方图; (c) 梯度计 I_c 散点图; (d) 梯度计直方图
 Fig. 6. Distribution of I_c under different external magnetic fields of MAG & GRA: (a) The I_c scatter plot of MAG; (b) the MAG histogram; (c) the I_c scatter plot of GRA; (d) the GRA histogram.

3.4 磁强计与梯度计的最大电压摆幅统计

SQUID 的电压摆幅 (V_{PP}) 直接反映了器件对磁通量子化过程的响应灵敏度与动态范围. 图 7 展示了 171 个芯片的最大电压摆幅 ($V_{PP(MAX)}$) 与其对应的偏置电流 (I_b). 可以看出, 芯片的最大电压摆幅存在较大的离散性. 但无论是磁强计还是梯度计, 最大电压摆幅主要集中于 80—120 μV 范围, 对应偏置电流在 15—20 μA 之间. 较大的电压摆幅不仅有利于直读电路的读出, 也有利于器件输出稳定, 减少系统内部电平波动干扰, 而小的工作电流也会显著地降低系统功耗. 然而, 部分器件表现出显著降低的电压摆幅, 这是由于磁通钉扎效应引发的局部磁通困陷现象, 当外磁场超过一定数值时, 磁通涡旋穿透超导环并被晶格缺陷或界面势垒钉扎, 局部失去完全抗磁性, 限制 SQUID 内部磁通变化, 导致动态响应能力下降, 表现为电压摆幅压缩.

3.5 磁场噪声分析

SQUID 噪声包括热波动噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声 [25], 其中热涨落噪声和散粒噪声在频率上

呈白噪声特性, 即与频率无关. 而在低频区, SQUID 噪声谱密度随频率降低而上升, 表现出明显的 $1/f$ 特性, 该现象主要来源于约瑟夫森结临界电流涨落与环路内磁通随机运动. 如图 8 所示, 低频段噪声随频率降低而逐渐上升, 呈现出典型的 $1/f$ 噪声特性. 其中磁强计在 0.1—10 Hz 低频段噪声幅度及波动范围明显高于梯度计, 反映其对环境干扰更加敏感, 而梯度计的差分结构有效抑制了共模低频噪声. 在 50 Hz 及其整数倍频率处可见明显的工频干扰及谐波尖峰, 此干扰来源于环境电网干扰. 在中高频段, 随着频率升高, $1/f$ 噪声逐渐减弱, 系统噪声逐渐过渡为热涨落噪声或散粒噪声主导的白噪声区域, 噪声谱密度曲线趋于平坦或略微下降. 磁强计与梯度计在该频段性能相近.

图 9 展示了磁强计与梯度计磁场噪声的统计分布 (>10 kHz). 从图 9(a) 和图 9(b) 可以看出, 磁强计与梯度计的磁场噪声主要集中在 $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@ > 10 \text{ kHz}$ 以下, 表明其整体噪声水平较低. 但也有部分通道的噪声超过了 $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@ > 10 \text{ kHz}$, 这种现象与局部薄膜缺陷有关, 导致某些通道的噪声显著高于平均水平.

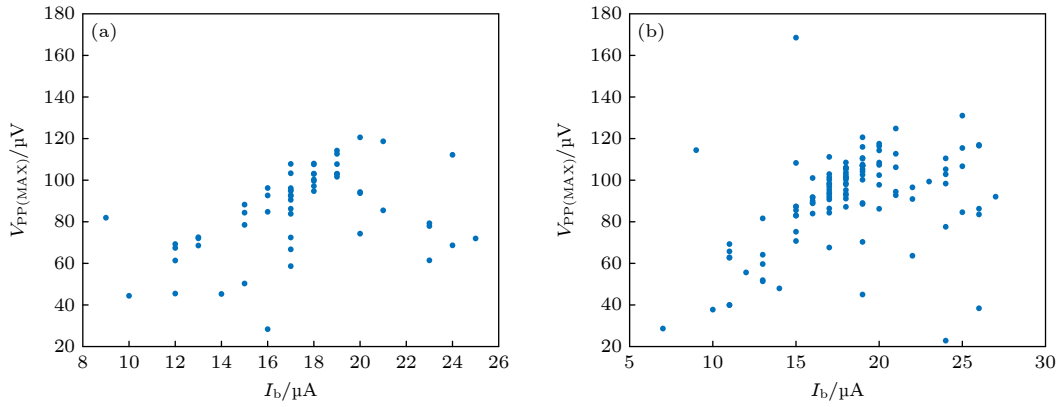


图 7 最大电压摆幅与偏置电流对应图 (a) 磁强计; (b) 梯度计

Fig. 7. Plots of maximum voltage swings and bias currents: (a) Magnetometers; (b) gradiometers.

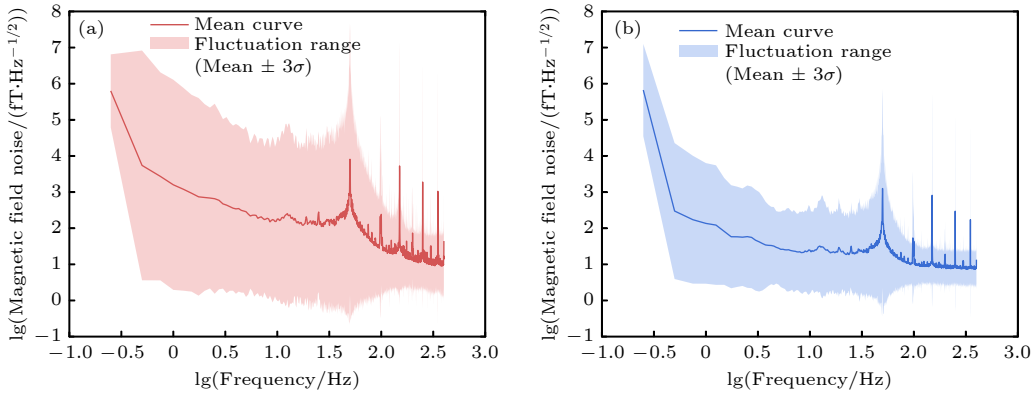


图 8 SQUID 芯片低频磁场噪声 Z-score 谱 (对数坐标) (a) 磁强计低频噪声 Z-score 谱; (b) 梯度计低频噪声 Z-score 谱 (实线表示噪声的均值曲线, 阴影部分表示噪声的波动范围 (Mean \pm 3 σ))

Fig. 8. Z-score spectrum of low-frequency magnetic field noise of SQUID chip (logarithmic coordinate): (a) Z-score spectrum of low-frequency noise of MAG; (b) Z-score spectrum of low-frequency noise of GRA (The solid line represents the mean noise curve, and the shaded area indicates the noise fluctuation range (Mean \pm 3 σ)).

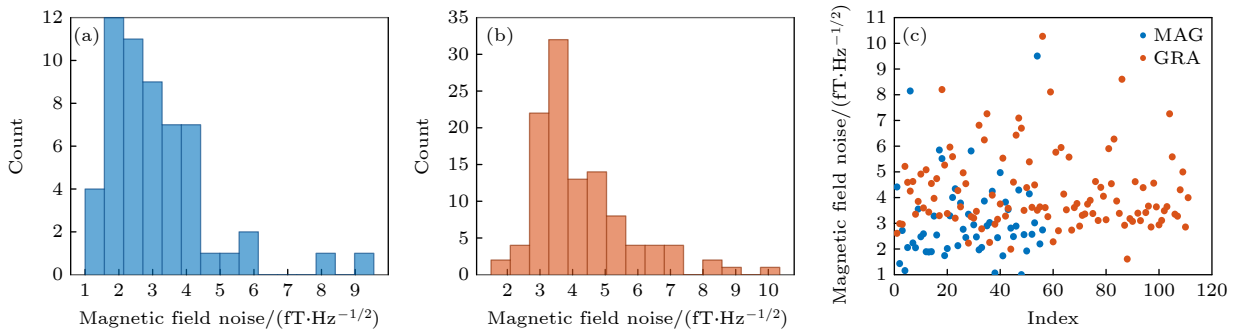


图 9 磁强计与梯度计磁场噪声 (a) 磁强计磁场噪声分布图; (b) 梯度计磁场噪声分布图; (c) 磁强计与梯度计磁场噪声散点图
Fig. 9. MAG & GRA magnetic field noise: (a) The noise distribution plot of MAG; (b) the noise distribution plot of GRA; (c) the noise scatter plot of MAG and GRA.

本文磁场噪声主要表征为白噪声密度, 即高频段 (通常为 10 kHz 以上) 处的噪声水平. 尽管在生物磁应用中, 目标信号主要分布在 0.1—50 Hz 的低频范围, 但此频段的噪声测量极易受到环境磁场扰动与背景干扰的影响, 难以准确地反映器件的

本征噪声水平. 实际系统中常采用硬件屏蔽与信号处理算法相结合的方法来提取有效的低频信号 [2,26,27]. 因此, 在芯片性能评估阶段, 普遍采用白噪声密度作为 SQUID 器件固有性能的重要表征指标. 基于所测得的本征噪声水平, 可认为本文所涉

及的绝大多数芯片均已具备满足脑磁信号探测需求的灵敏度。

3.6 与商用 SQUID 的噪声对比

SUPRACON GmbH 生产的 2.5 mm×2.5 mm SQUID 传感器具有优秀的低磁场噪声性能, 典型值约为 $8 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 特别适用于 MEG 及其他生物医学成像领域. 其读出设备测量数据显示噪声水平约为 $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. 相比之下, STAR Cryoelectronics 提供的六款 2 mm×3 mm SQUID 传感器的磁通噪声在 $3\text{--}4 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 范围内, 主要应用于心磁学领域. 商用的 Elekta SQUID 传感器阵列在 MEG 应用中表现出色, 其磁强计尺寸为 2.1 mm×2.8 mm, 梯度计尺寸为 2.6 mm×2.6 mm, 提供的磁场噪声为 $3 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Elekta 的传感器在阵列优化配置方面具有显著优势, 能够在多个传感器协同工作时保持低噪声水平, 这对于大规模 MEG 数据采集至关重要. 由 SIMIT 研发的 MEG SQUID 设备包括磁强计和梯度计, 测试结果显示 171 个 SQUID 中, 81% 的磁通噪声低于 $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 并且具有较大的反馈线圈耦合系数和较低的工作电流. 总体而言, SIMIT 的 SQUID 设备在噪声性能方面接近商用 Elekta SQUID 设备, 表现出优异的性能.

4 结 论

本文描述了一种应用于低温超导脑磁系统的 SQUID 设计及制备过程, 采用亚微米约瑟夫森结制备技术, 实现尺寸为 $0.7 \mu\text{m}\times 0.7 \mu\text{m}$ 的亚微米约瑟夫森结. 通过 Al 和 Nb 引线键合工艺, 将 SQUID 与独立的探测线圈进行集成封装, 形成面向低温超导多通道脑磁系统的集成 SQUID 磁强计和梯度计. 并进行了 SQUID 芯片性能的批量测试, 包括 $I\text{-}V$ 特性、 $V\text{-}\Phi$ 特性、白噪声分布.

测试结果表明, 梯度计和磁强计的磁场噪声主要集中在 $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@ > 10 \text{ kHz}$ 以下, 占比高达 81%, 晶圆综合良率为 78%. 此外, SQUID 能够在低工作电流 (15—20 μA) 下实现较大的调制摆幅, 显著地降低了系统功耗. 并且较大的耦合系数和调制摆幅表明 SQUID 器件对相同磁通变化的电流响应更强, 从而提高了其对弱磁场信号的灵敏度.

总体而言, 本文制备的 SQUID 在白噪声性能、调制摆幅及工作电流等方面表现优异, 可以应用到极弱磁场测量的场景. 未来的研究会重点集中

在进一步优化 SQUID 芯片的生产工艺, 减少批次间的性能差异, 提升芯片的稳定性和一致性.

感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所提供的超导器件加工测试平台.

参考文献

- [1] Ding H S, Chen G H, Zhang L H, Huang X G, Yang Q S 2006 *J. Univ. Sc. Technol. Beijing.* **28** 863 (in Chinese) [丁红胜, 陈庚华, 张利华, 黄旭光, 杨乾声 2006 北京科技大学学报 **28** 863]
- [2] LI H, Zhang M Y 2025 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **74** 1
- [3] Maslennikov Y V, Slobodchikov Y V, Krymov V A, Gulyaev Y V 2023 *Pattern Recognit. Image Anal.* **33** 1402
- [4] Sheng J W, Gao J H 2021 *Physics* **50** 463 (in Chinese) [盛经纬, 高家红 2021 物理 **50** 463]
- [5] Lin J, Wang M C, Zhao J 2020 *J. Harbin Inst. Technol. (New Series)* **27** 101
- [6] Qi H H 2004 *Ph. D. Dissertation* (QingHuangdao: YanShan University) (in Chinese) [漆汉宏 2004 博士学位论文 (秦皇岛: 燕山大学)]
- [7] Persky E, Sochnikov I, Kalisky B 2022 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **13** 385
- [8] Sochnikov I, Davino D, Kalisky B 2020 *Phys. Rev. Appl.* **14** 014020
- [9] Granata C, Vettoliere A, Vaccarone R 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 796
- [10] Koelle D, Kleiner R, Ludwig F, Dantsker E, John C 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** 631
- [11] Enpuku K, Minotani T 2001 *IEICE Trans Electron*, E84C 43
- [12] Faley M I, Dammers J, Maslennikov Y V, Schneiderman J F, Winkler D, Koshelets VP, Shah N J, Dunin-Borkowski R E 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 83001
- [13] Bechstein S, Köhn C, Drung D, Jan-Hendrik S, Kieler O, Morosh V, Schurig T 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 34007
- [14] Carmine Granata, Vettoliere Antonio 2016 *Phys. Rep.* **614** 1
- [15] Cantor R, Hall J 2005 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 82
- [16] Xiong W, Ying L L, Wang H, Zhang G F, Wang Z 2015 *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices Shanghai China, November 20–23, 2015* p282
- [17] Schmelz M, Zakosarenko V, Schönau T, Anders S, Kunert J, Meyer M, Meyer H G, Stolz R 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 74010
- [18] Grönberg L, Kiviranta M, Vesterinen V, et al. 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 125016
- [19] Storm J H, Kieler O, Korber R 2020 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** 1
- [20] Zhang G F, Zhang X, Wang Y L, Rong L L, Xie X M, Wang Z 2019 *Physica C Supercond. Appl.* **562** 32
- [21] Shnyrkov V I, Shapovalov A P, Lyakhno V Y, et al. 2023 *Supercond. Sci. Technol.* **36** 035005
- [22] Xie M, Schneiderman J F, Chukharkin M, Kalaboukhov A, Whitmarsh S, Lundqvist D, Winkler D 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 6940248
- [23] Ni Z 2024 *Ph. D. Dissertation* (shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology) (in Chinese) [倪志 2024 博士学位论文 (上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所)]

- [24] Ono R H, Koch J A, Steinbach A, Huber M E, Cromar M W 1997 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** 2538
 [26] Wang Y L, Zhang S L, Zhang G F, Xu X F, Zhang C X, Wang Y, Xie X M 2020 *Physica C* **575** 1353685
 [25] Enpuku K, Yoshida K, Kohjiro S 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 4218
 [27] Li H, Zhang M Y 2024 *Physica C* **625** 1354575

Design and performance evaluation of integrated superconducting quantum interference device chips for superconducting brain magnetometer systems*

LI Jialin ¹⁾²⁾³⁾ ZHANG Guofeng ^{2)3)4)†} LI Siyao ²⁾³⁾⁵⁾ WANG Tianjun ²⁾³⁾
 WEI Xueqi ²⁾³⁾⁴⁾ LI Hua ²⁾³⁾⁴⁾ GU Yuandong ¹⁾ SUN Limin ^{2)3)4)5)‡}

1) (*College of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, China*)

2) (*State 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 Superconductor Integrated Circuit Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

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

5) (*School of Intelligent Medicine, China Medical University, Shenyang 110122, China*)

(Received 2 April 2025; revised manuscript received 15 July 2025)

Abstract

Superconducting quantum interference device (SQUID) is one of the most sensitive flux sensors and is critical in fields such as biomagnetism, low-field nuclear magnetic resonance (NMR), and geophysics. In this paper, an integrated magnetoencephalography (MEG) SQUID chip is investigated in detail, which consists of a magnetometer and two gradiometers. The SQUID and pick-up coils are fabricated on different-sized wafers. The SQUID is fabricated on a commercial silicon substrate using micro- and nano-fabrication processes, including thin-film growth, i-line stepper photolithography, and reactive ion etching (RIE). The sub-micron Josephson junction technology is employed to achieve a junction size of $0.7\ \mu\text{m}\times 0.7\ \mu\text{m}$ with a junction capacitance of only 0.05 pF. The pick-up coil is designed as a single-turn coil for a magnetometer and a planar first-order gradient coil for a gradient sensor. The MEG SQUID chips are tested in a well-shielded chamber with the helium-liquid temperature (4.2 K). Customized low-voltage noise readout circuit and source measure units are used to characterize the magnetic field white noise, current-voltage (I - V) characteristics, and voltage modulation amplitude of 171 SQUID channels. The results show that 81% of the SQUID chips exhibit the lower magnetic field noise ($< 5\ \text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$), and the high modulation amplitudes (in a range of 80–120 μV) with the low working currents of 15–20 μA , yielding a wafer yield rate of 78%. In summary, the SQUIDs show excellent performance in terms of magnetic field white noises, modulation amplitudes, and working currents, which are suitable for the very weak magnetic signal detection. One of future studies will focus on optimizing the SQUID chip fabrication process to minimize performance variations between chips on the same wafer.

Keywords: superconducting quantum interference device, magnetometer, gradiometer, magnetic field noise

PACS: 85.25.Dq, 07.55.Ge

DOI: [10.7498/aps.74.20250426](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250426)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250426](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250426)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFF1202800) and the National Talent Innovation Project of China (Grant No. E28JRA1).

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

‡ Corresponding author. E-mail: limin.sun@mail.sim.ac.cn



应用于超导脑磁系统的集成超导量子干涉器件芯片的设计与性能评估

李加林 张国峰 李思瑶 王甜璐 魏雪齐 李华 古元冬 孙立敏

Design and performance evaluation of integrated superconducting quantum interference device chips for superconducting brain magnetometer systems

LI Jialin ZHANG Guofeng LI Siyao WANG Tianjun WEI Xueqi LI Hua GU Yuandong SUN Limin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 198501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250426

CSTR: 32037.14.aps.74.20250426

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250426>

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

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>

串联超导量子干涉器件阵列制备与测试分析

Fabrication and experimental analysis of series superconducting quantum interference device array

物理学报. 2021, 70(17): 178501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210467>

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>

量子网络中基于弹性散射的微波光子传输调控

Control of microwave photon transmissions in microwave quantum networks by elastic scattering

物理学报. 2025, 74(16): 162501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250404>

Bi₂O₂Se纳米线的生长及其超导量子干涉器件

Growth of Bi₂O₂Se nanowires and their superconducting quantum interference devices

物理学报. 2024, 73(4): 047803 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231600>

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>