



直流超导量子干涉仪 低噪声、高带宽读出电子学研究

面向**TES**阵列频分复用与低温精密计量应用

王宇、刘树彬、上官培客、刘建国

中国科学技术大学

2026年3月29日



- I.*** 背景介绍
- II.*** TES 阵列频分复用 (FDM) 读出电子学
- III.*** 低温测量低噪声读出电子学
- IV.*** 总结与展望



I. 背景介绍

II. TES 阵列频分复用 (FDM) 读出电子学

III. 低温测量低噪声读出电子学

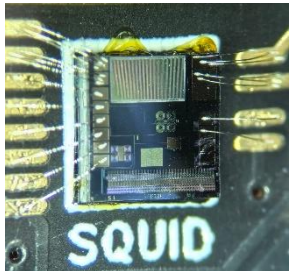
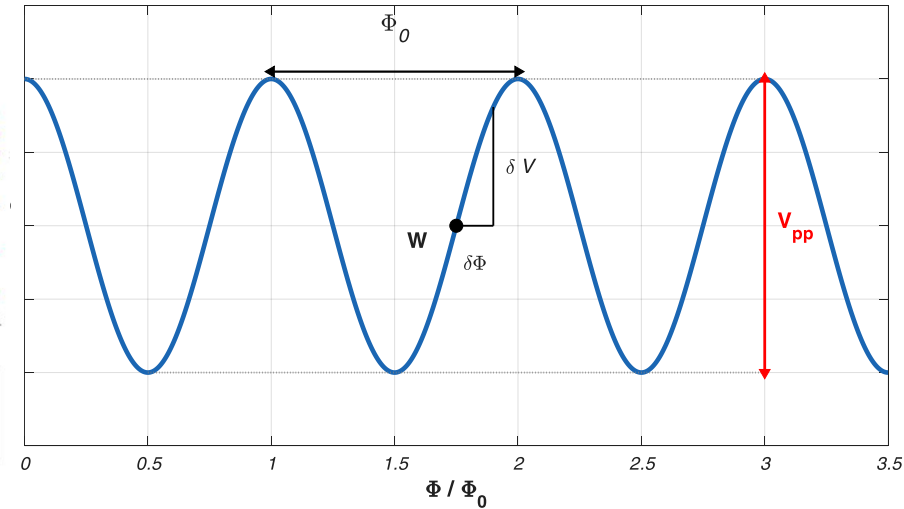
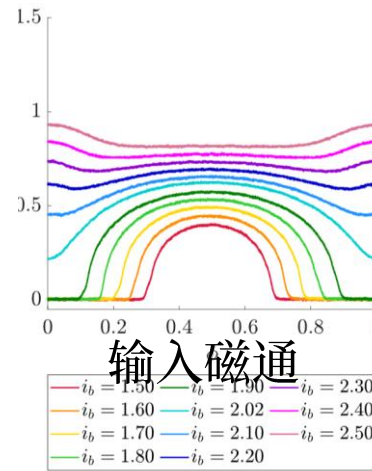
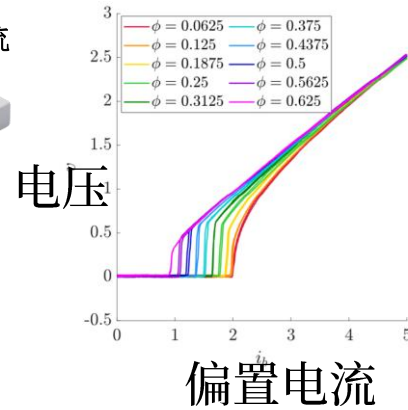
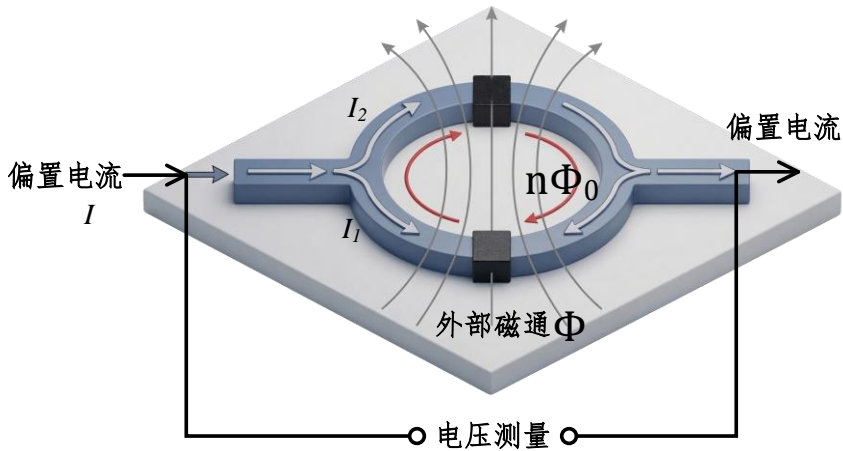
IV. 总结与展望

DC SQUID: 高灵敏度特性



- 由两个约瑟夫森结并联构成
- 输出电压/电流对磁通敏感: 数百 $\mu V/\Phi_0$
- 输出信号呈现以 Φ_0 为周期的变化

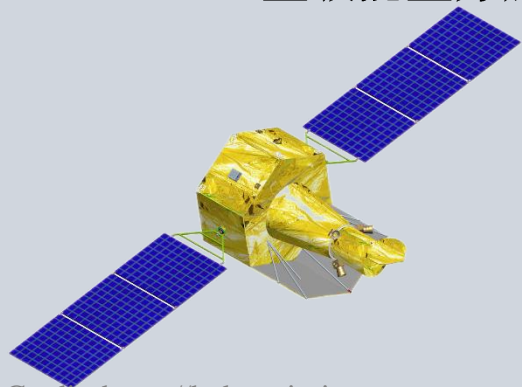
- 高灵敏度: 磁通噪声低至 $\mu\Phi_0/\text{Hz}$ 。
- 高增益: 将极其微弱的电流/磁通变化转换为室温电子学可识别的电压信号
- 极低温环境工作: 低热载荷工作



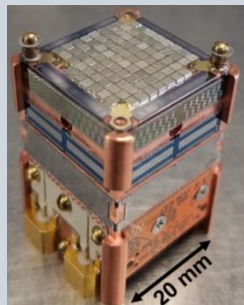
SQUID的输出与偏置电流和偏置磁通相关

$$\Phi_0 \approx 2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$$

- 天文与粒子物理探测：微量能器读出
 - $\sim eV$ 量级能量分辨率

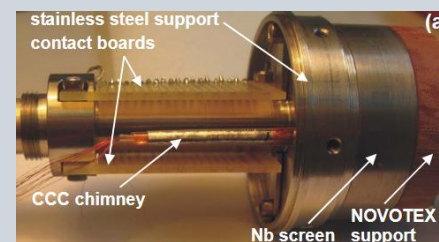


Credit: <https://hubs-mission.cn>



Credit: NIST microcalorimeter array

- 量子信息与精密计量
 - mK甚至 μK 级温度测量



Credit: doi.org/10.1109/CPE.M.2014.6898570



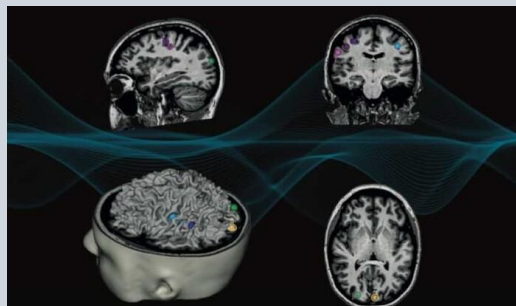
Credit: Xu Xiaolong-MFFT/CSNT



- 生物磁测量
 - 百fT量级磁场测量精度



Credit: <https://megin.com/>



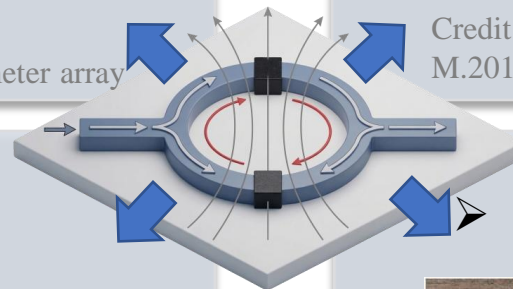
- 地磁测量与非破坏性检测



Credit: doi.org/10.1063/5.0315645

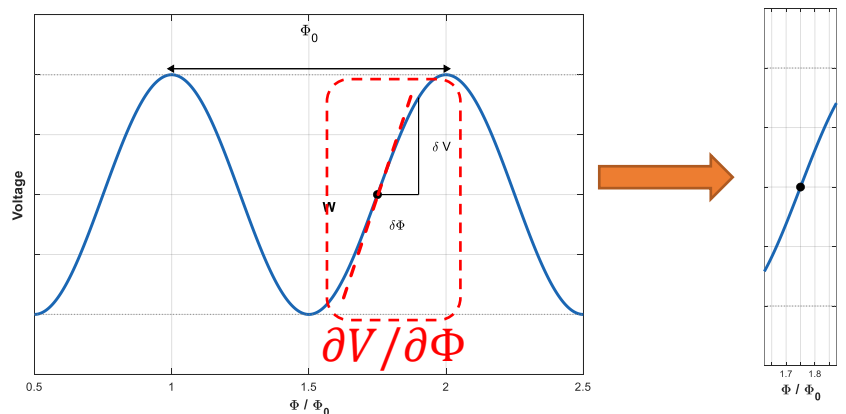
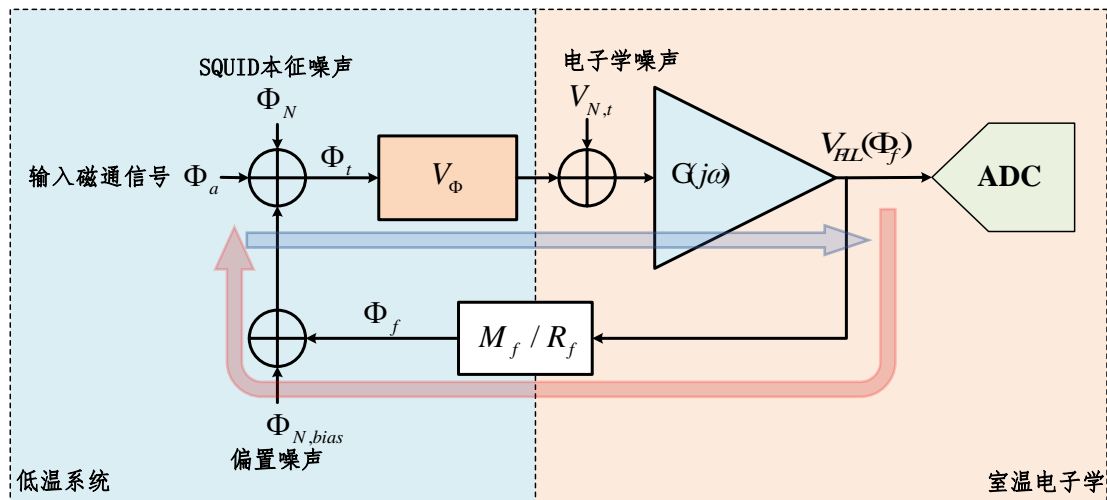


Credit: <https://www.pile.com>



➤ 从非线性到线性化：磁通锁定环路

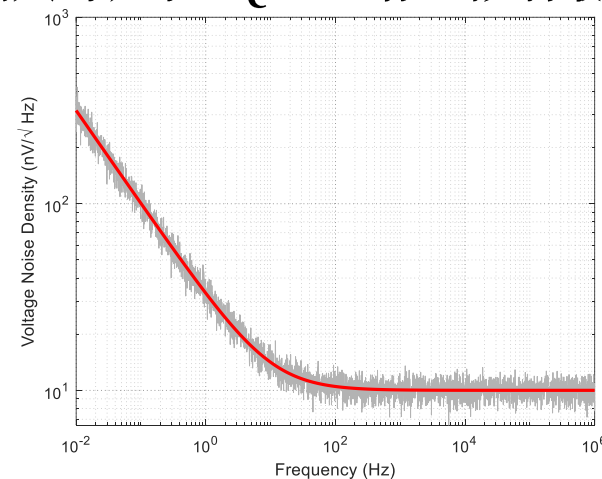
- 通过磁通反馈将SQUID锁定在特定的线性工作点



➤ 核心挑战

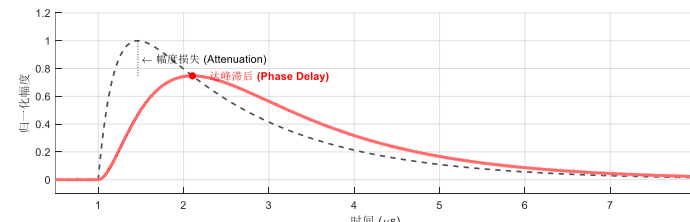
- 极低等效输入噪声
- ✓ 电子学的等效输入噪声和SQUID增益影响最终的磁通噪声

$$S_{\Phi} = S_v / V_{\Phi}$$



- 高带宽反馈

- ✓ 带宽决定了信号跟踪能力
- ✓ 带宽不足可能导致信号幅度损失、甚至导致SQUID失锁

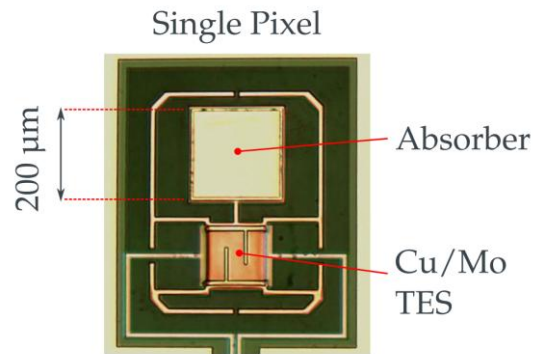




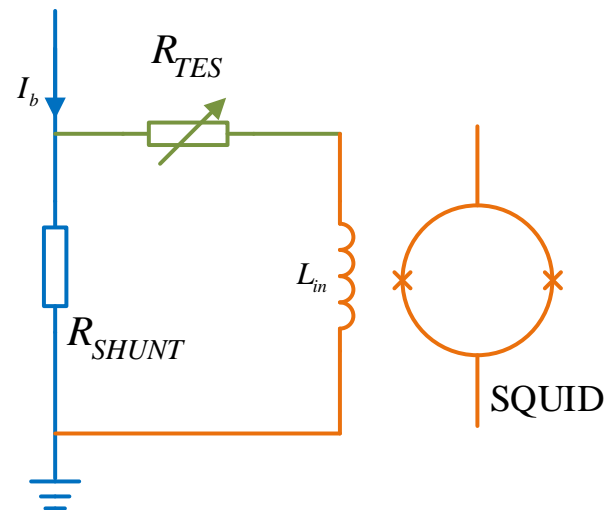
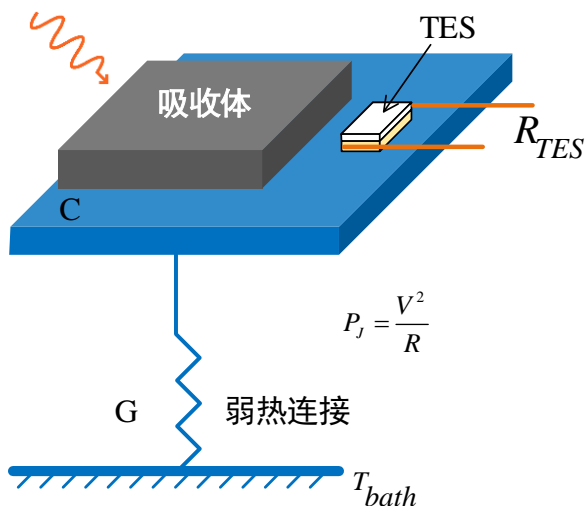
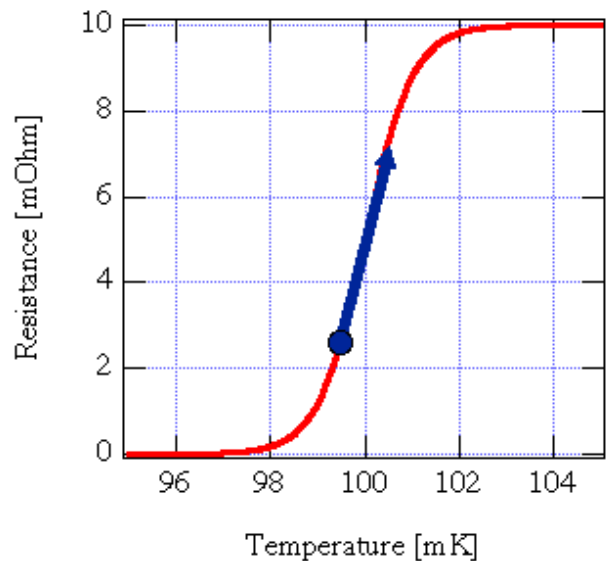
- I. 背景介绍
- II. TES 阵列频分复用 (FDM) 读出电子学**
- III. 低温测量低噪声读出电子学
- IV. 总结与展望

➤ 超导转变边缘传感器(TES)

- 处于超导态和非超导态转换区间的材料
- 电阻值随温度剧烈变化
- 沉积能量转换为热量，TES电阻值随热量沉积变化
- 超高能量分辨率：eV量级



Credit: HOLMES collaboration



➤ TES量能器规模化阵列

- 提升视场与成像
- 提升观测效率和计数率上限

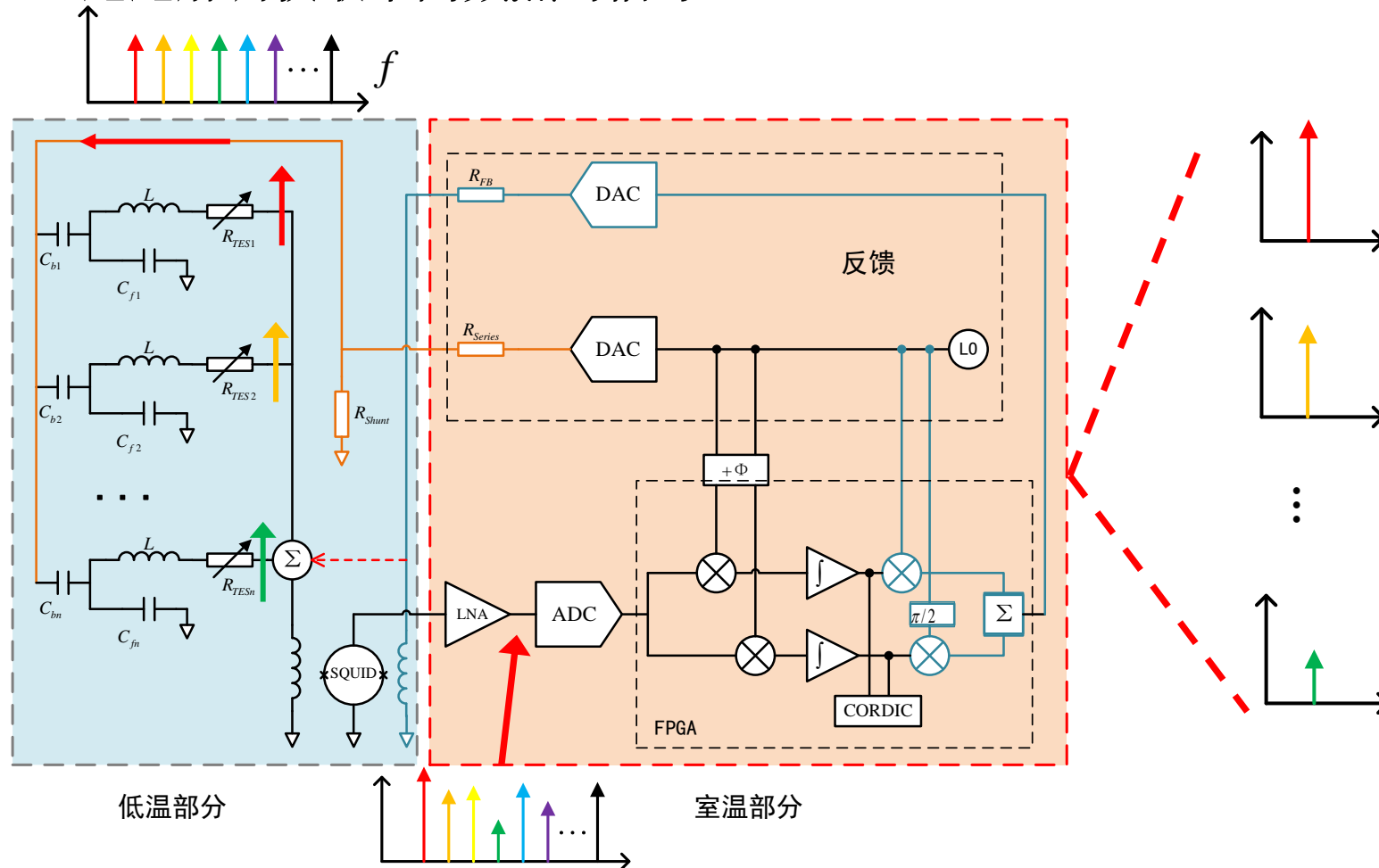


➤ 读出方式选择

- 并行直接读出
- 复用读出

➤ MHz频分复用读出

- 每个TES与一个无源LC滤波器连接，并用MHz频率的交流信号偏置
- 通过解调获取不同频点的信号



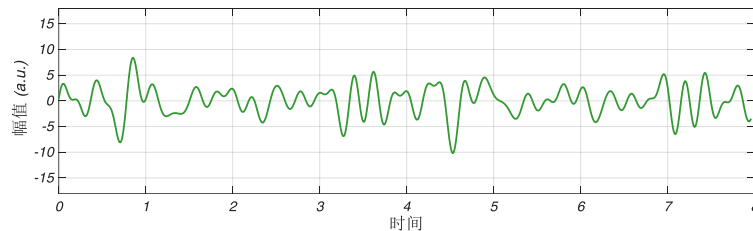
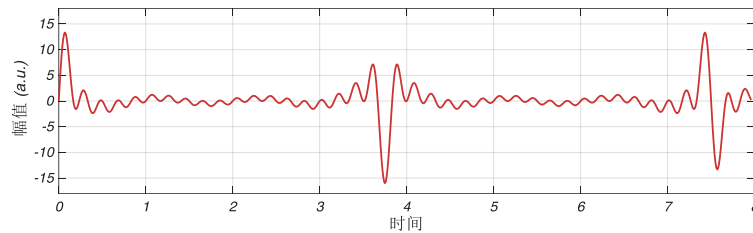
➤ FDM 优点:

- 低功耗
- 可单独调节TES
- 噪声不随复用数目增加
- 电路抗干扰较好
- 室温电路实现难度适中

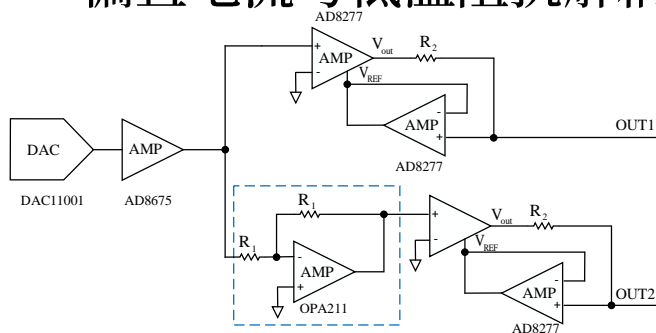
⇒适用于空间软X射线探测

➤ 高精度偏置信号的产生

- 交流偏置波峰因子优化
- ✓ 提升可偏置通道数

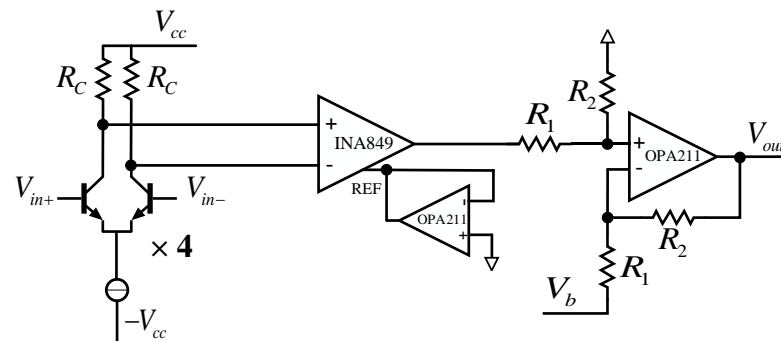


- 偏置电流与低温阻抗解耦



➤ 低噪声前放与低延迟采样

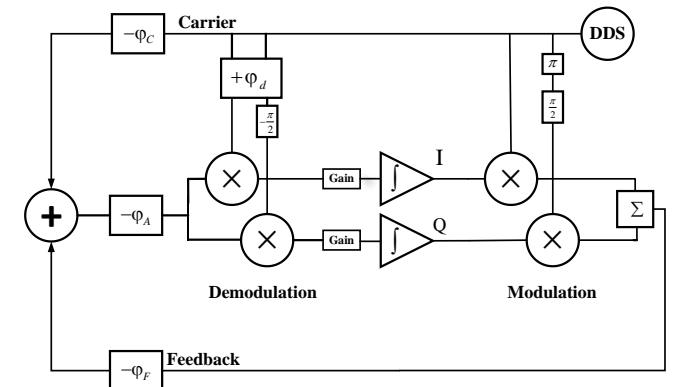
- 1-5MHz大带宽范围
- 大于60dB增益
- 保持增益平坦度



- 适中功耗的高精度采样
- ✓ 16 bits
- ✓ 50Msps

➤ FPGA反馈算法

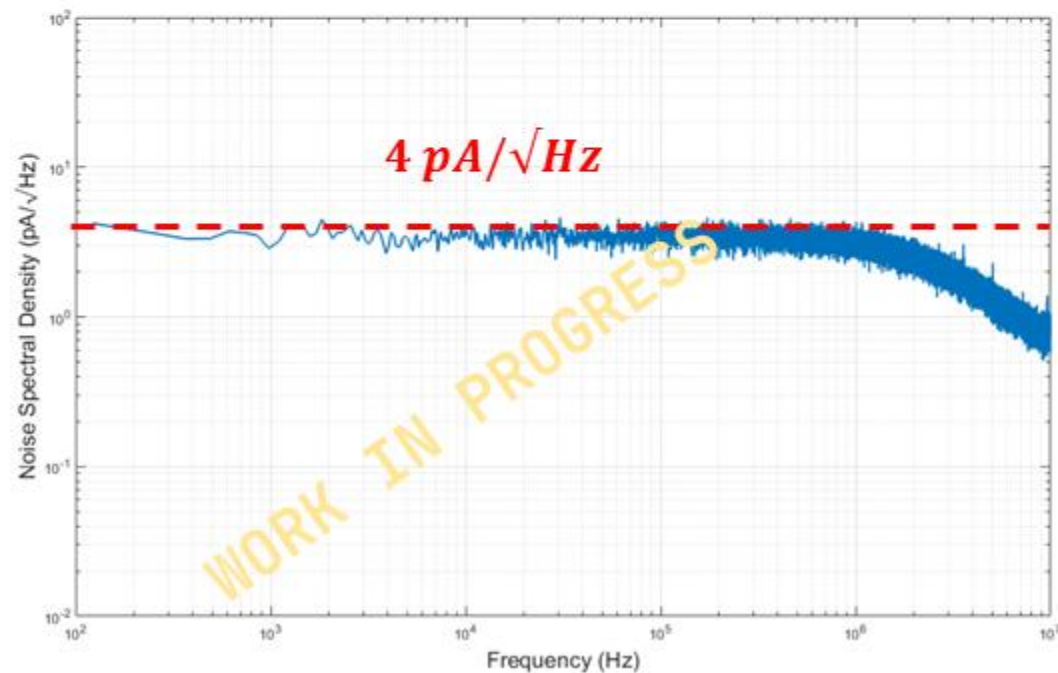
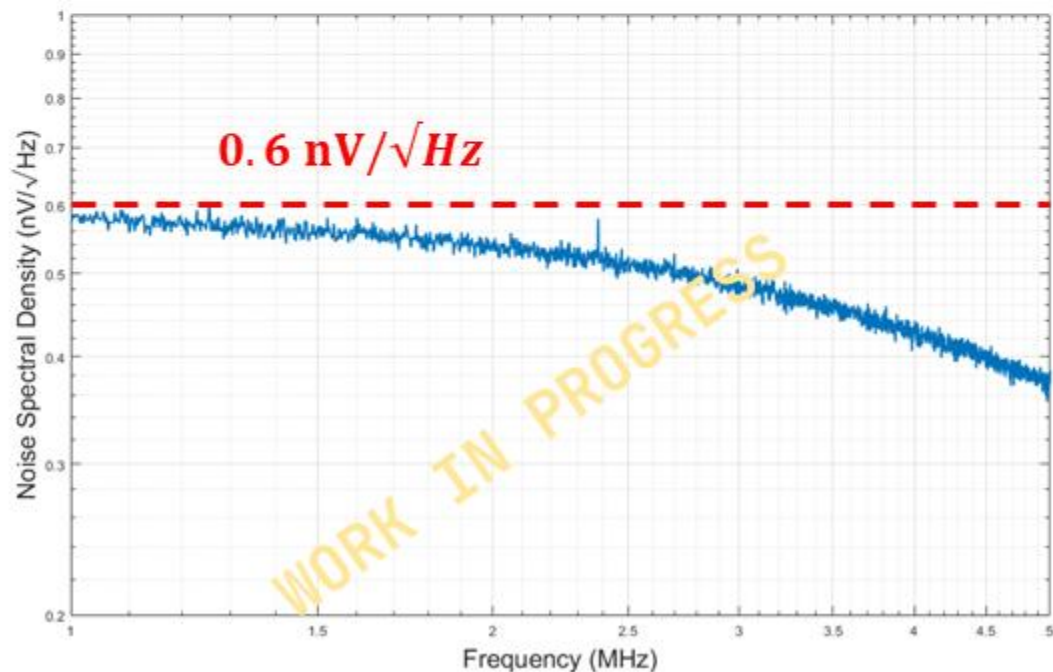
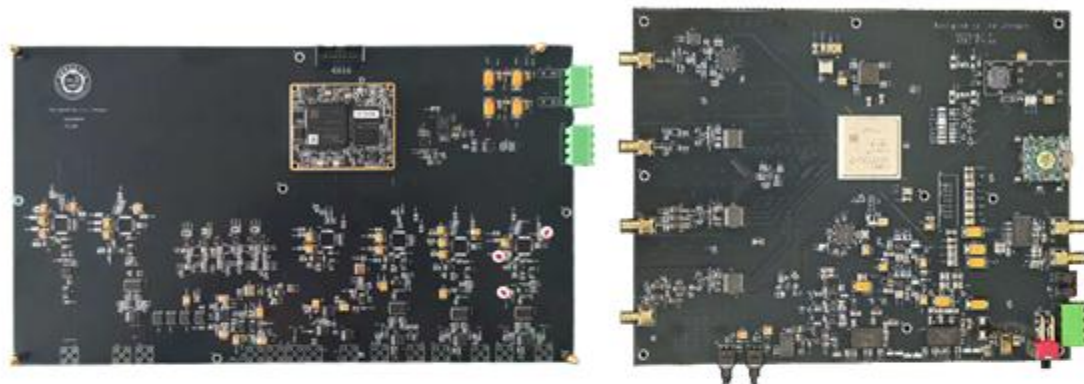
- BBFB基带反馈算法
- 解调相位自适应算法
- ✓ 实现不同TES反馈信号自适应计算



- 低延迟反馈计算
- ✓ 采用累加器替代低通滤波
- ✓ 反馈延迟: 360 ns

➤ 低噪声放大、数据采集、BBFB电路

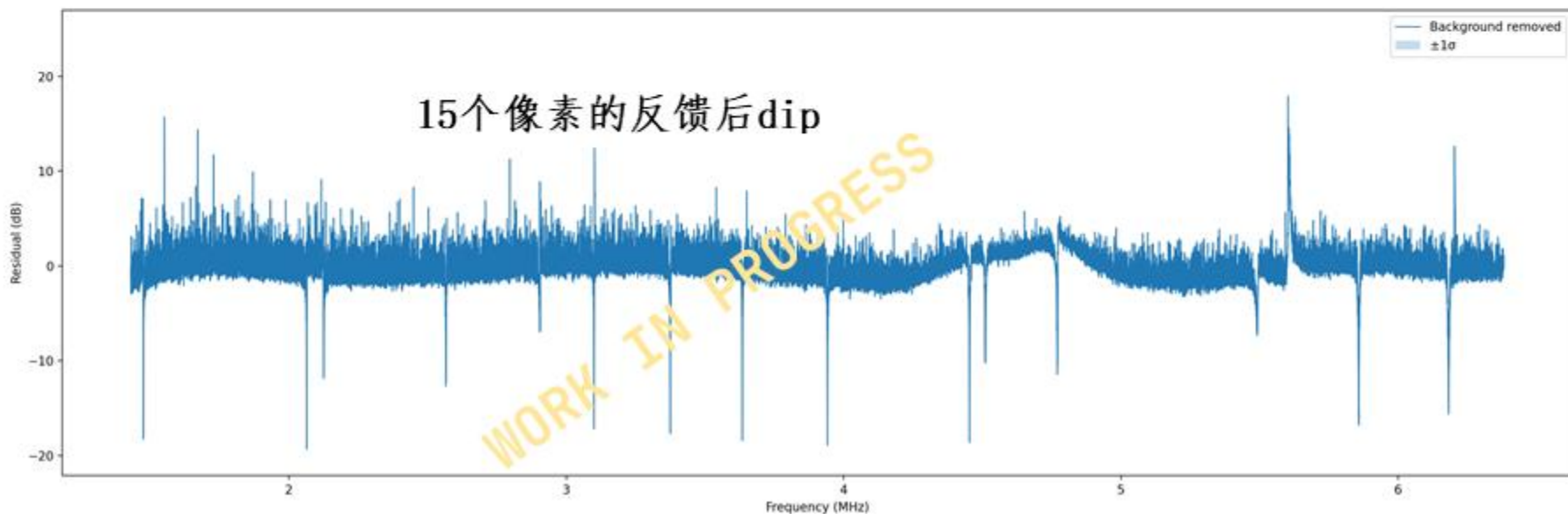
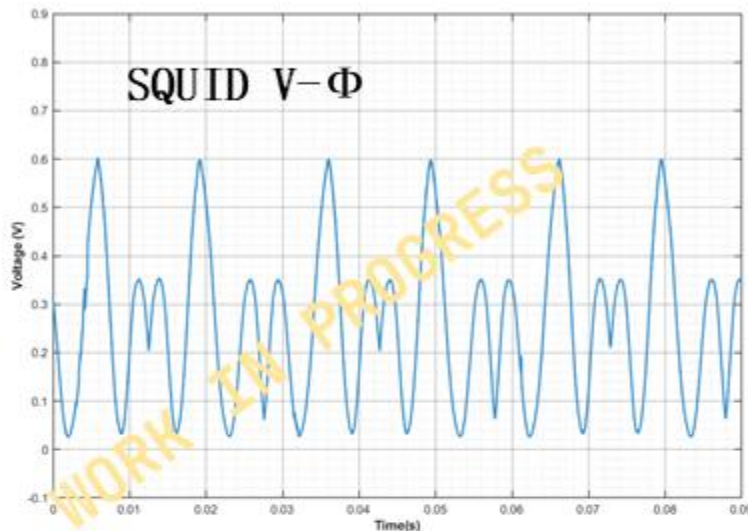
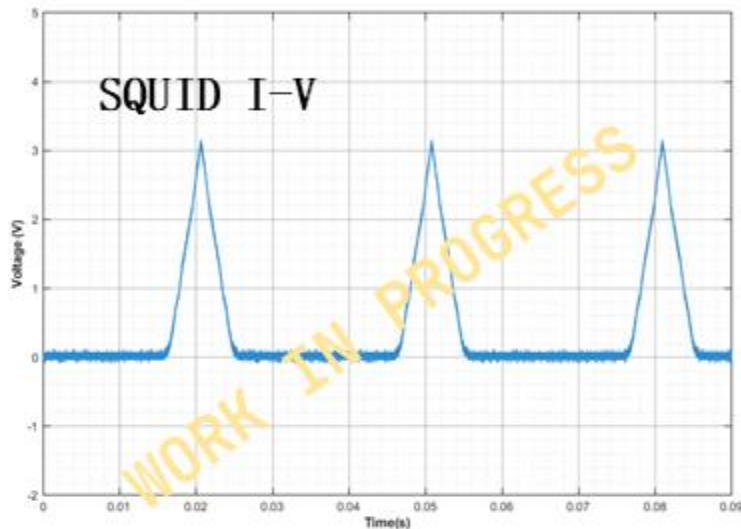
- 增益3700
- 带宽4.8 MHz
- LNA等效输入噪声 $0.6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($0.6 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$)
- BBFB闭环等效电流噪声贡献 $4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$



➤在ADR上进行读出测试

- 完成两级SQUID的读出
- 实现了15个像素的偏置和反馈
- TES I-V测试正在进行

室温电子学



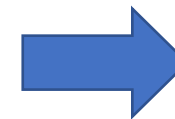


- I. 背景介绍
- II. TES 阵列频分复用 (FDM) 读出电子学
- III. 低温测量低噪声读出电子学**
- IV. 总结与展望

➤ 控温的准确性是低温实验的关键保障

- 控温准确性依赖于温度测量的准确性
- 制冷机常用的氧化钆测探头在几十mK量级表现不佳，非线性显著

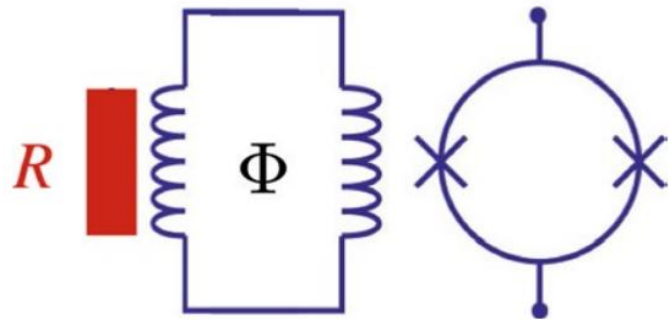
指标名称	约翰逊噪声温度计		电阻型温度计	
温度计名称	磁场波动温度计 (MFFT)	电流感应噪声温度计 (CSNT)	氧化钆温度计	铯铁温度计
覆盖温区	1mK~4.2K, 温度连续可读		5mK- 40K	0.5 K- 27 K
工作原理	奈奎斯特定理：从其热磁噪声谱中推导出传感器的温度		电阻随温度降低而升高，读出对应的阻值	可通过残余电阻率随温度变化
相对不确定度	1%	1%	随温度变化, 10%@10mK; 0.38%@4.2 K	稳定性误差小于 3mK



以SQUID为核心器件的噪声温度计能以最便捷的方式实现低温温度测量
同时也能实现原级温度计量

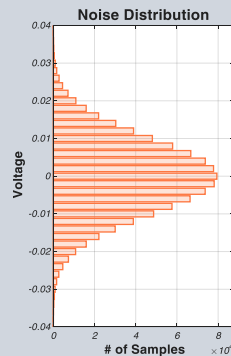
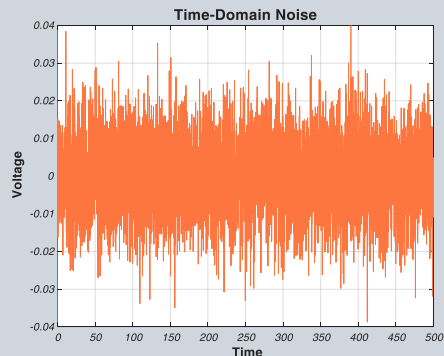
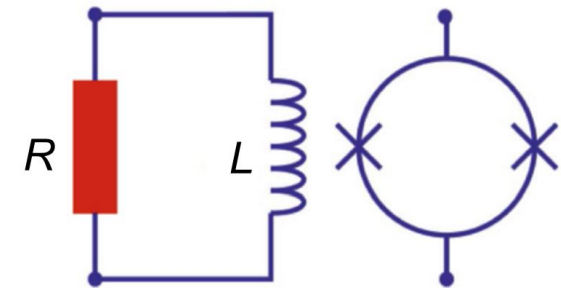
➤磁通热涨落噪声温度计(MFFT)

- 采用磁场耦合方式
- 将电子温度经由超导线圈进行信号采集
- 由SQUID读出温度噪声谱信号



➤电流敏感型噪声温度计(CSNT)

- 采用电阻内电子温度经由超导线圈进行信号采集
- 由SQUID读出温度噪声谱信号



$$\overline{V_n^2} = 4k_B T \Delta f$$

约翰逊噪声

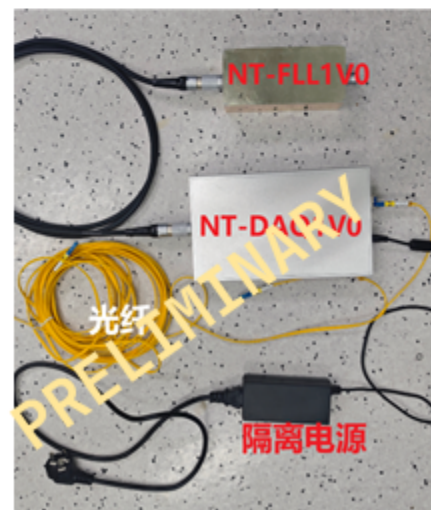
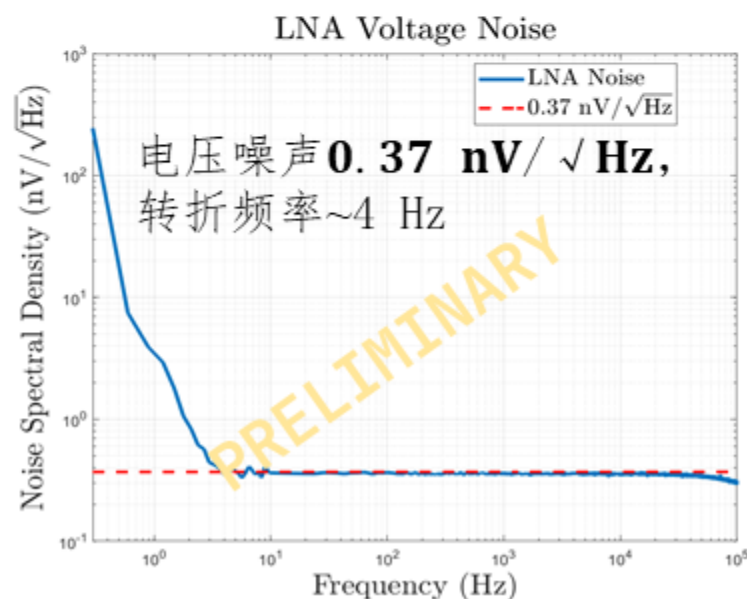
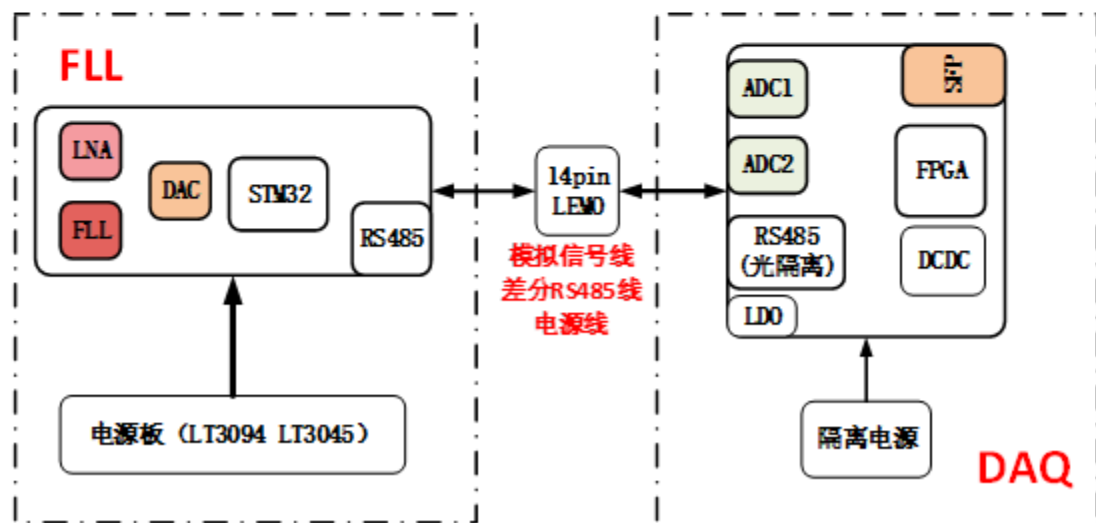
$$S_\Phi = \frac{kT}{1 + \left(f^2 / f_c^2 \right)}$$

➤ 核心需求

- 等效输入噪声：10mK温度对应信号约百 $\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ ，电子学噪声应当尽可能降低
- 低频信号提取：噪声温度计有效信号集中在低频，要求室温前放的转折频率尽可能低
- 长期增益稳定性：电子学漂移贡献要远小于测量精度

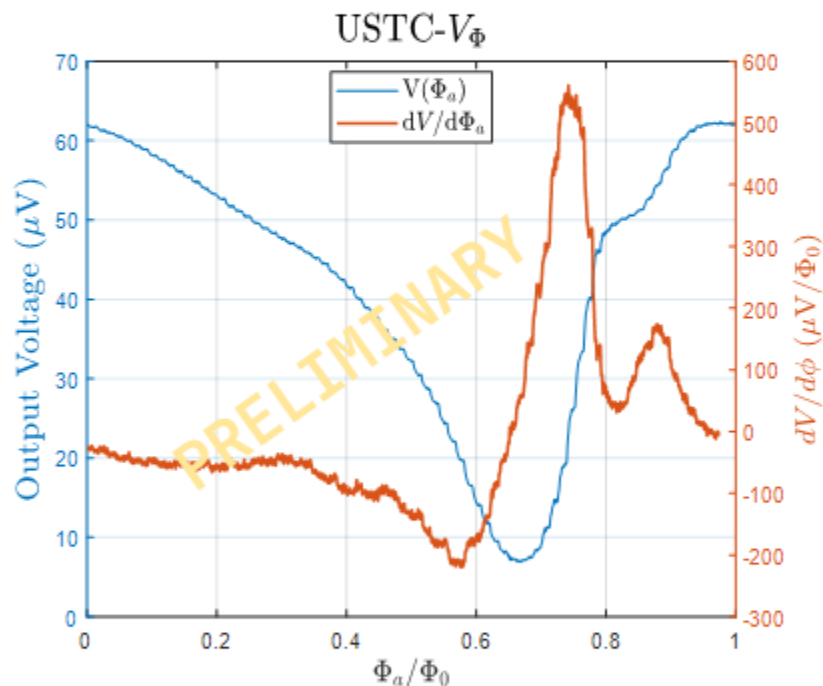
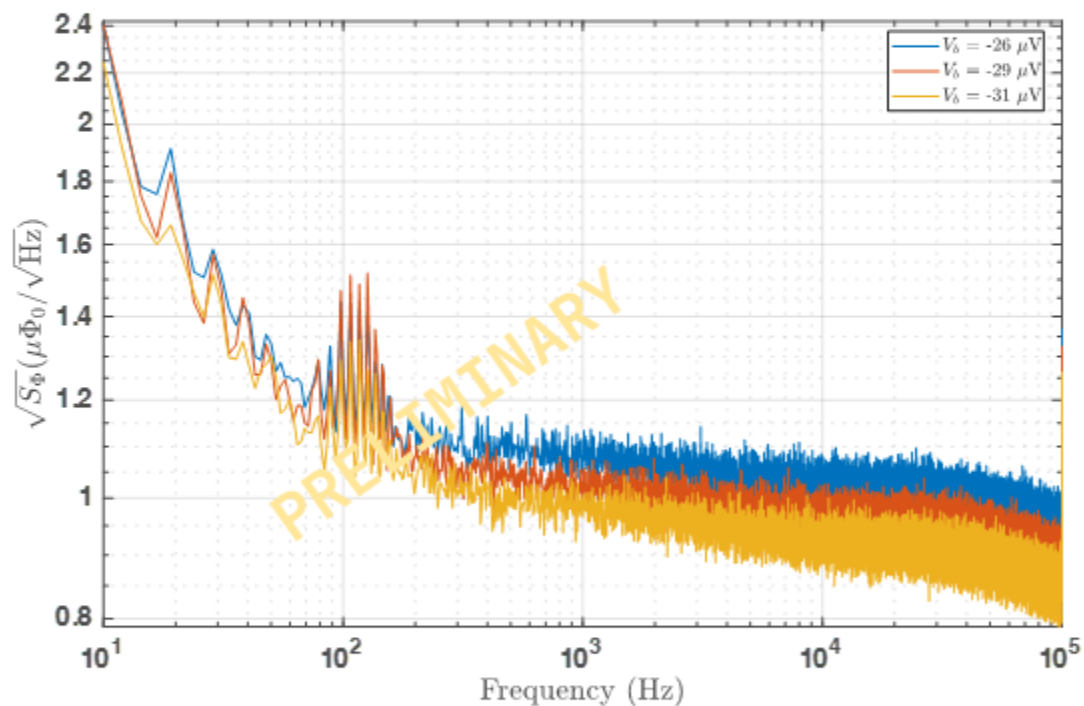
➤ 读出系统设计

- 采用并联BJT结构，电子学等效输入噪声 $0.37 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，转折频率4 Hz
- 通过光纤进行数据传输，实现地隔离



➤ 配合单级SQUID进行测试

- 本底噪声 $1\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$



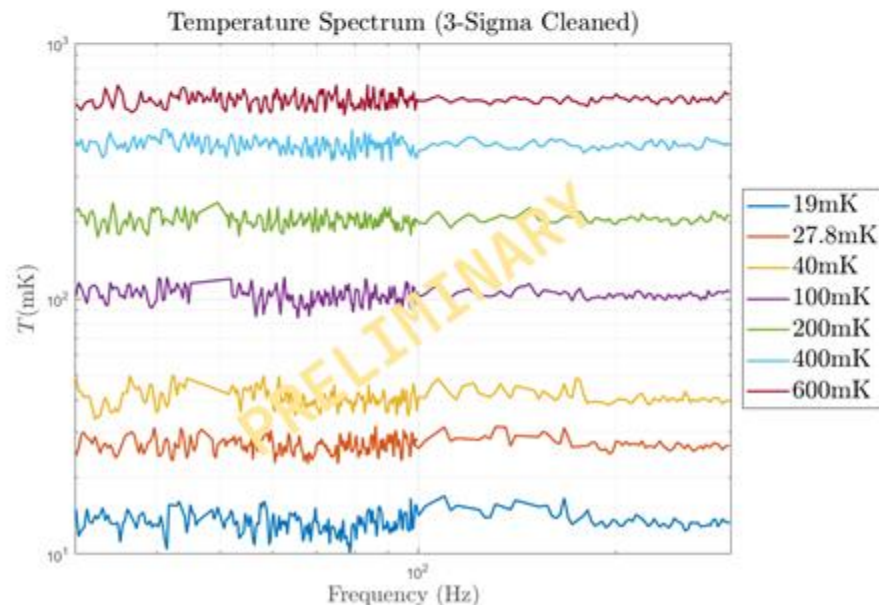
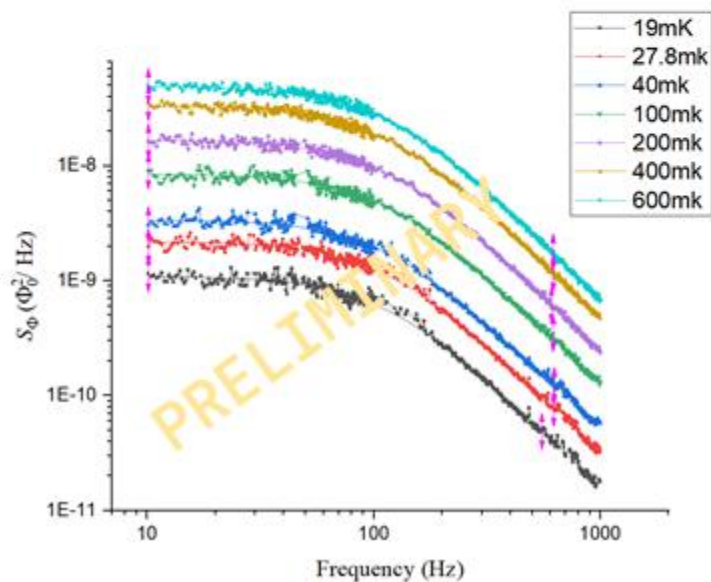
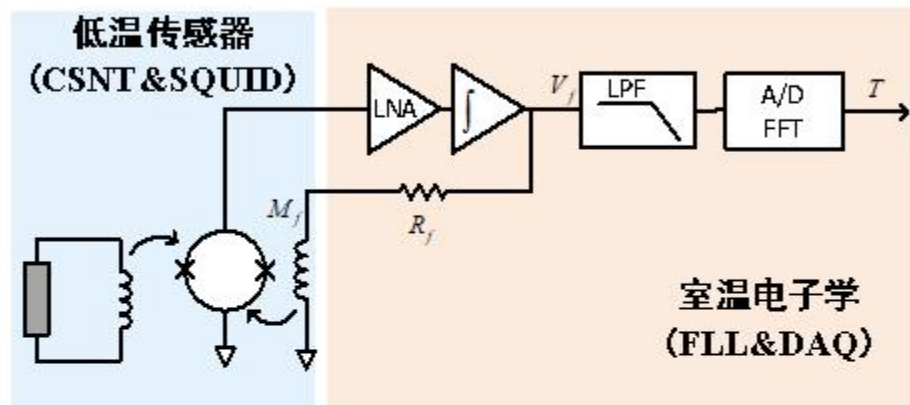
锁定点对磁通噪声影响相对较小 (V_Φ 均在 $400\mu\text{V}/\Phi_0$ 以上)

1kHz处磁通锁定噪声: $1\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ ($V_\Phi \approx 550\mu\text{V}/\Phi_0$)

► 利用CSNT/MFFT实现10mK~600mK温度测量

- 使用室温电子学采集SQUID信号
- 通过磁通噪声分布计算温度
- 210s内实现好于0.5%的温度测量不确定度

$$S_{\Phi} = \frac{kT}{1 + (f^2 / f_c^2)}$$





- I. 背景介绍
- II. TES 阵列频分复用 (FDM) 读出电子学
- III. 低温测量低噪声读出电子学
- IV. 总结与展望**

➤ 总结

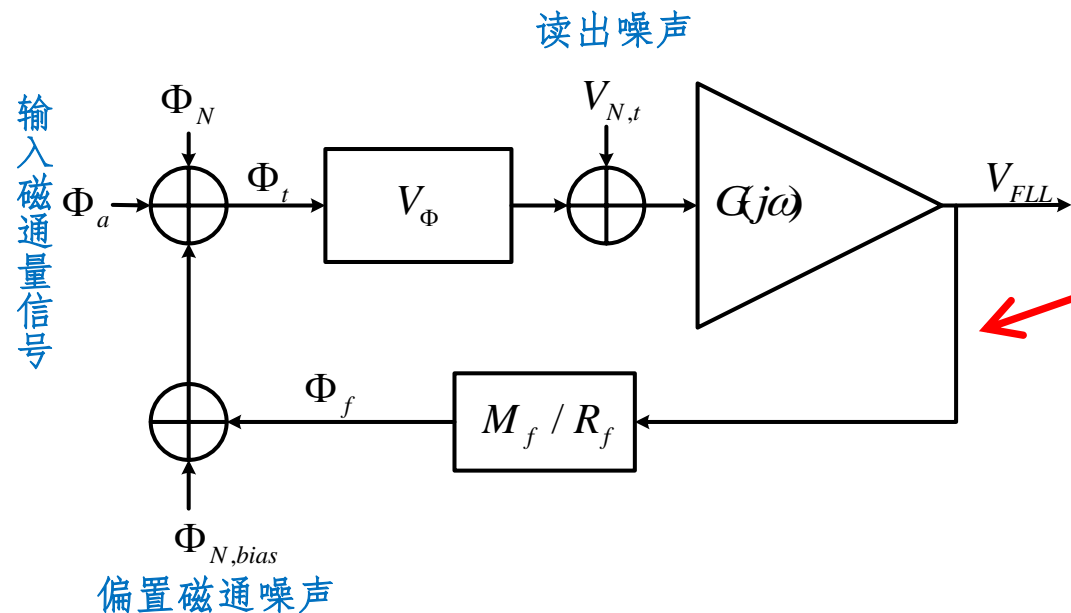
- FDM 读出电子学：建立了基于FPGA的频分复用读出系统，成功实现15个TES像素同步反馈，具备阵列扩展能力
- 低温温度测量：研制了高稳定性MFFT/CSNT读出系统，实现低至10mK温区优于0.5%的测量不确定度，支撑低温平台的建设

➤ DC SQUID读出电子学的优化方向

- 更低噪声
 - 提升系统灵敏度
 - 利于SQUID优化
- 更灵活的反馈方式和更高的反馈带宽
 - 应对快脉冲信号和
 - 提升系统稳定性
- 多通道并行读出
 - 多通道关联测量、最优滤波
 - 阵列量能器高精度读出

➤ 噪声与带宽的权衡与协同优化

- 高带宽对带内功率谱密度提出更高要求 ⇔ 环路参数制约闭环噪声水平
- ✓ 极低电压噪声前端架构: BJT/JFET 并联阵列
- ✓ 混合反馈回路 with 高带宽反馈策略设计



$$\Phi_f = (\Phi_a + \Phi_N + \Phi_{bias}) \cdot \frac{HV_\Phi}{1 + HV_\Phi} + V_N \frac{1}{1 + HV_\Phi}$$

$$H = G(j\omega) \frac{M_f}{R_f}$$

➤ 多通道读出: 利用互相关测量提升系统性能

⇒ Sensitivity



谢谢!

