

低温微量热器读出电子学系统 2020年研究进展报告

中国科学技术大学近代物理系
核探测与核电子学国家重点实验室

杨俊峰 汪洪潮 张雷 李毅

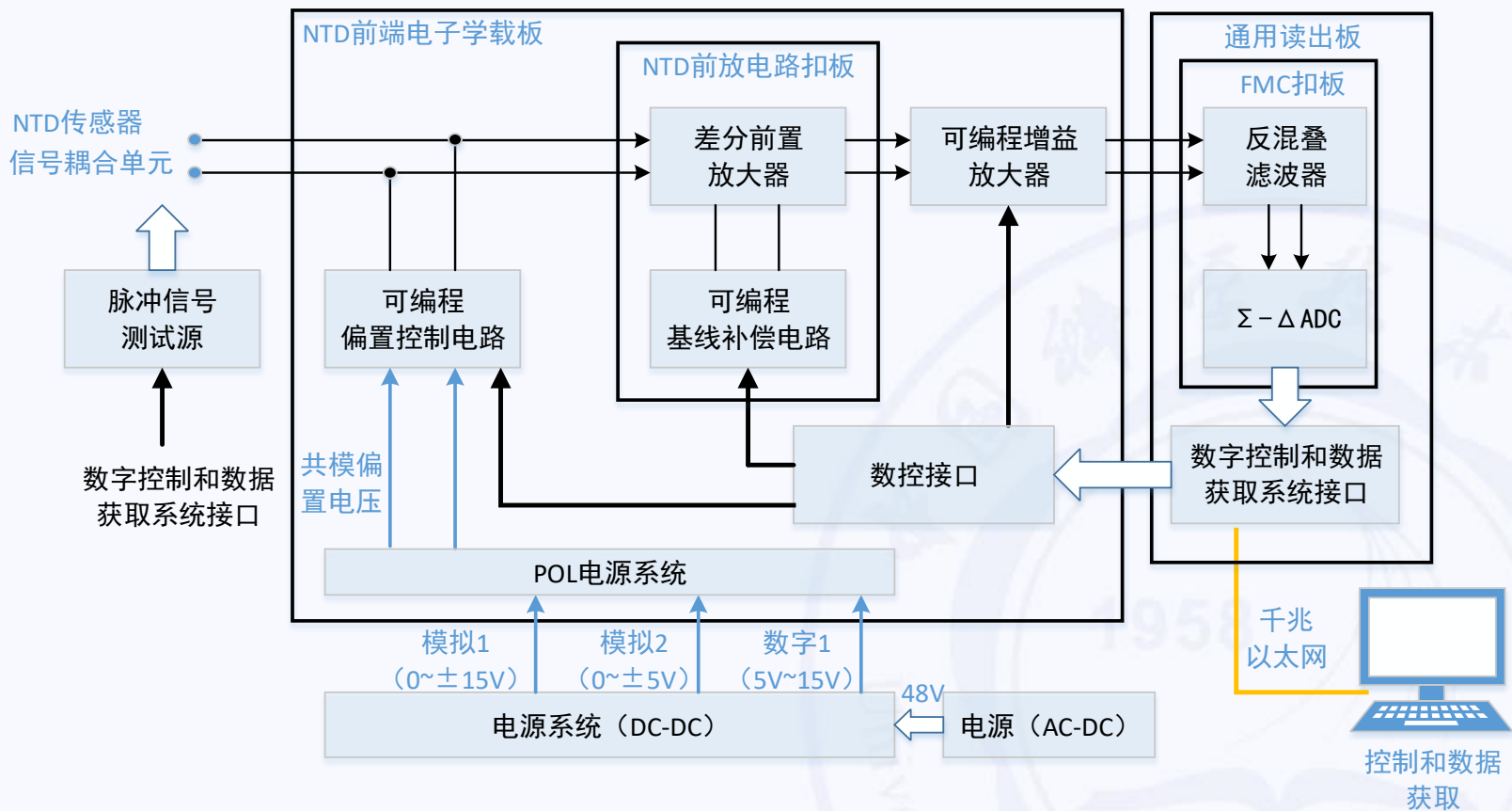
2020/12/28

报告提纲

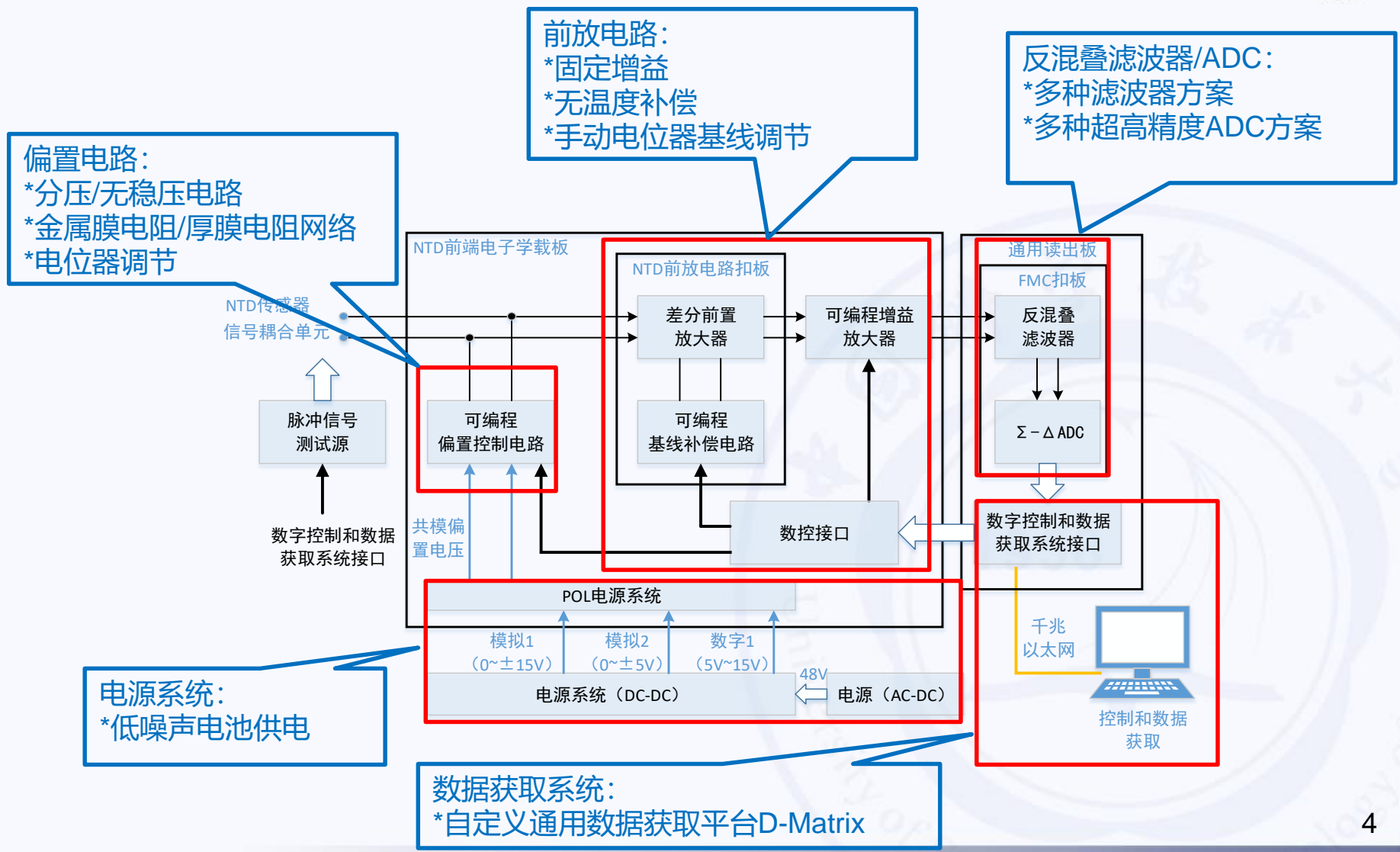
- 低温微量热器读出电子学系统简况
- 2020年工作进展
- 下一步工作计划



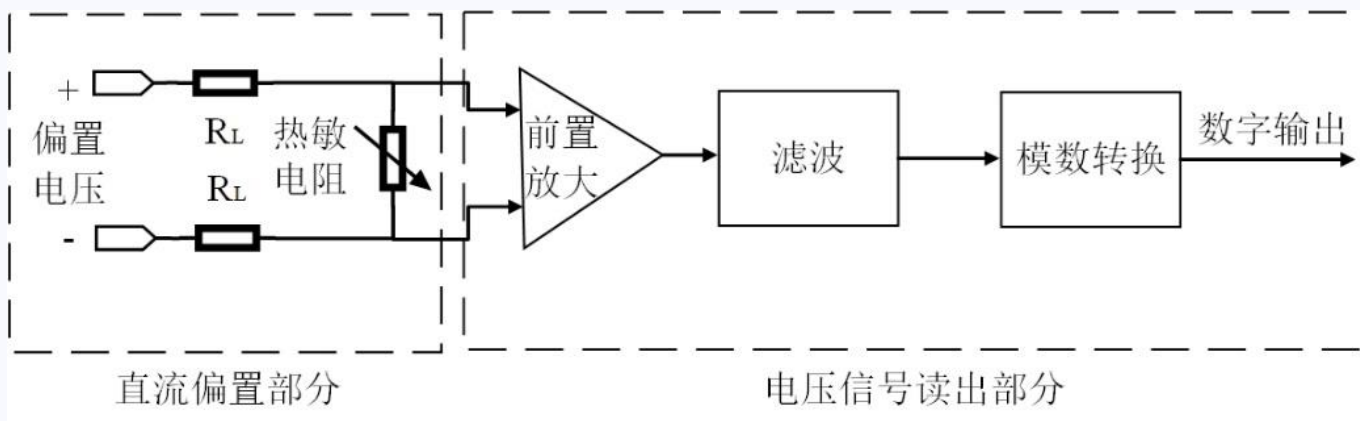
读出电子学系统框图



电子学系统研究技术路线



简化电子学系统框图



影响到性能的关键因素：信号特征

➤ 微量热器的响应函数

$$S(\omega) = \frac{\Delta X(\omega)}{W(\omega)} = \frac{1}{G_{eff}} \frac{1}{1 + j\omega\tau_{eff}} \frac{X\alpha A_{tr}}{T}$$

➤ 低通系统（信号频率 < 100 Hz）

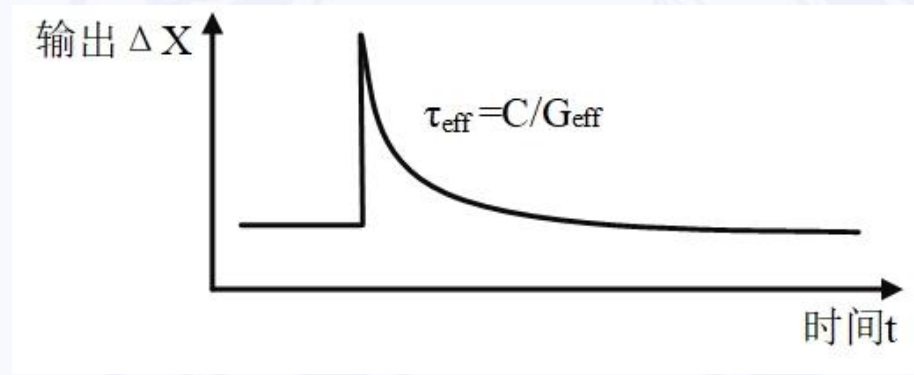
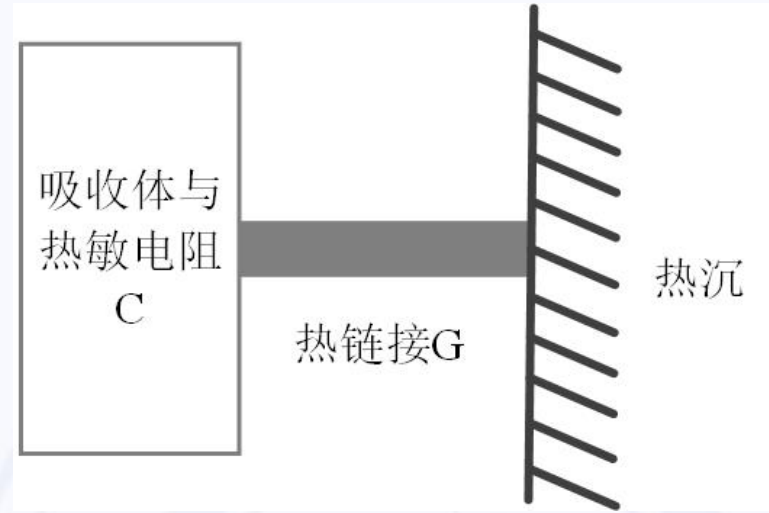
• ⇒ 合适的电子学系统带宽

➤ 对冲激信号响应

$$- X(t) = \frac{X\alpha A_{tr}}{TG_{eff}\tau_{eff}} W e^{-\frac{t}{\tau_{eff}}}$$

➤ 精确测量波形的幅值

• ⇒ 良好的幅频、相频特性



影响到性能的关键因素：噪声

➤ 吸收体热力学噪声 (Thermodynamic Fluctuation Noise, TFN)

- $p_{TFN}^2 = 4k_B T_S^2 G_0 F_{link}(t, \beta) \Rightarrow$ 难以抑制

➤ 热敏电阻热噪声 (Johnson Noise)

- $p_{nJ}^2(\omega) = \frac{4k_B T R_D P (1 + \omega^2 \tau^2)}{L_0^2} \Rightarrow$ 难以抑制

➤ 负载电阻热噪声 (Load Resistor Johnson Noise)

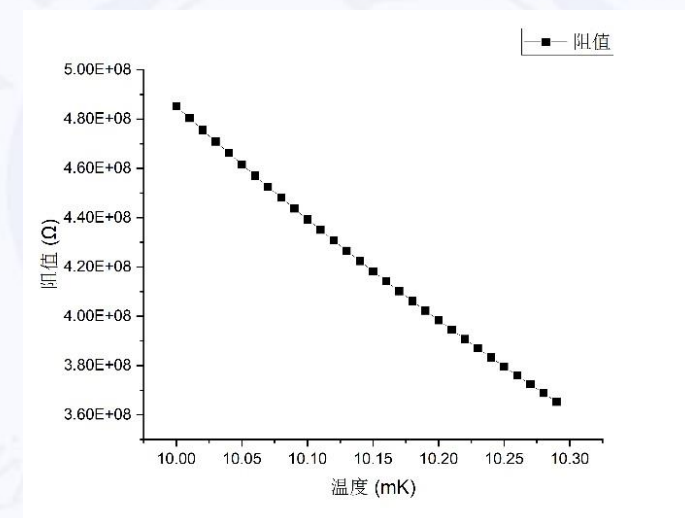
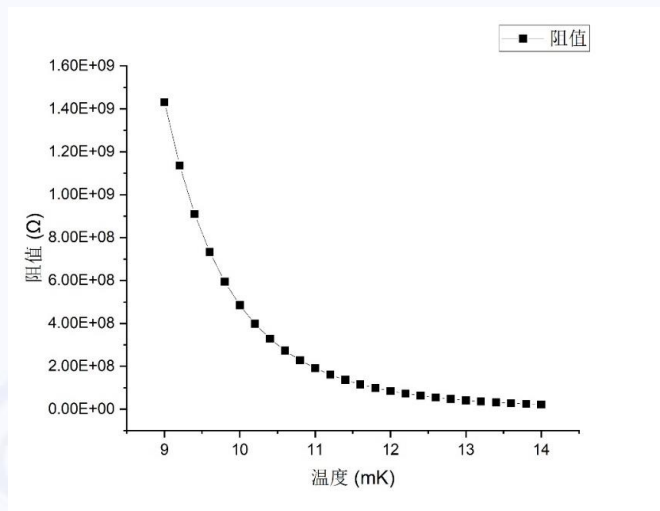
- $p_{nJ-load}^2 = 4k_B T_L P \frac{R_D}{R_L} \frac{(1 + L_0)^2 + \omega^2 \tau^2}{L_0^2} \Rightarrow$ 选择较大的负载电阻

➤ 读出电路噪声 (Amplifier Noise)

- $p_{n-AMP}^2 = \frac{e_{n-AMP}^2 I^2 (1 + \omega^2 \tau^2)}{L_0^2 K_L^2 K_F^2} + \frac{i_{n-AMP}^2 R P [(1 + L_0^2) + \omega^2 \tau^2]}{L_0^2} \Rightarrow$ 尽量抑制

影响到性能的关键因素：传感器特征

- 中子核嬗变掺杂锗传感器 (NTD)
 - 极低的工作温度：约10 mK
- $R(10\text{ mK}) = 4.8 \times 10^8 \Omega$
 - 足够大的负载电阻 (10G Ω 量级)
- 典型偏置电流 (0.05 nA)
 - 极小的放大电路输入电流 (< 1 pA)
- 量热器增益：约2 mV/MeV量级 (10 mK)
 - 足够低的RMS噪声 (<8.5 μV_{rms})
- 输出最大电压：约6 mV
 - 合适的放大倍数和输入电压范围



关键技术

- 超低噪声、低漂移、可调节的精密直流偏置电路设计
- 超低噪声、超大输入阻抗、超低漏电流的高性能前置放大电路设计
- 低噪声、线性相位抗混叠滤波器和高精度模数转换电路设计

报告提纲

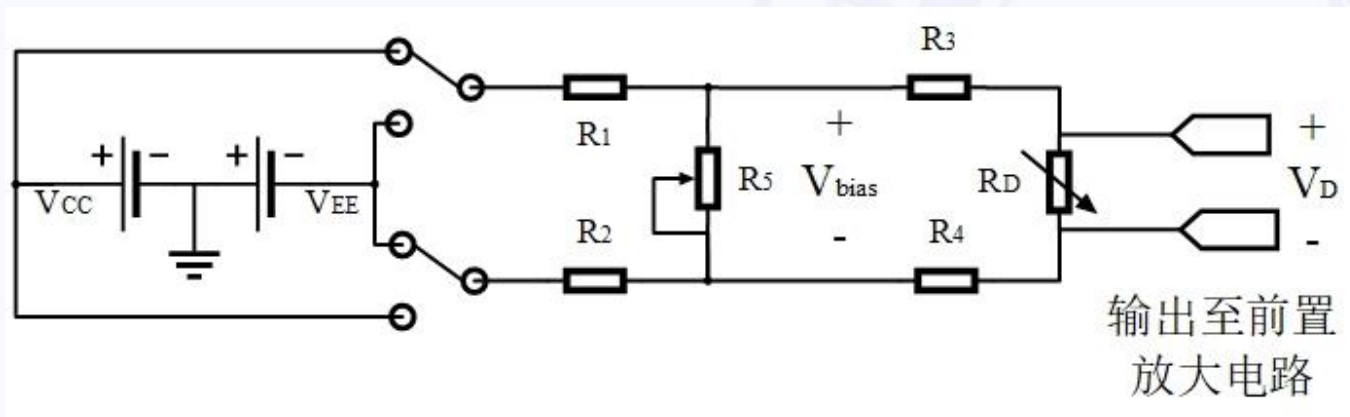
- 低温微量热器读出电子学系统简况
- 2020年工作进展
- 下一步工作计划



直流偏置电路

➤ 特征：

- 可调的偏置电压：金属膜/厚膜电阻网络，电位器调节
- 极低噪声的电压源：12V锂电池
- 极大阻值（ $G\Omega$ 量级）、低容差、低温漂的负载电阻：厚膜电阻



前置放大电路

➤ 输入级:

JFET型号	I_{dss}	最大 I_{gs}	最大 $U_{gs(off)}$	噪声系数
2N6451	50 mA	-0.1 nA	-3.5 V	5 nV/ \sqrt{Hz}
IF3601	30 mA	-0.1 nA	-2 V	0.3 nV/ \sqrt{Hz}
IF9030	30 mA	-0.1 nA	-2 V	0.5 nV/ \sqrt{Hz}
2sk146	30 mA	未注明	-0.7 V	未注明

2sk146型JFET

在反偏电压为1V, 温度为270K时, $I_{gs} \approx 10$ fA

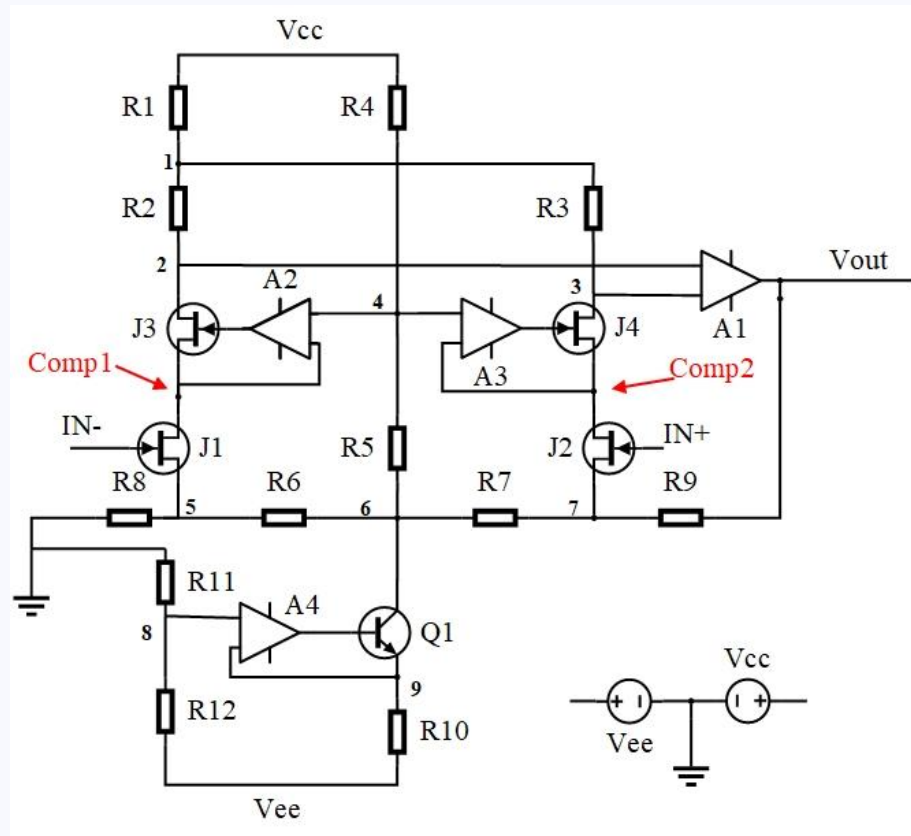
在反偏电压为1V, 温度为300K时, $I_{gs} \approx 60$ fA

在反偏电压为2V, 温度为300K时, $I_{gs} \approx 80$ fA

前置放大电路

➤ 放大电路

- JFET反偏电压: -1.5 V
- 输入电流: $< 0.1\text{ pA}$
- 放大倍数: ≈ 217
- 输出电压范围: $\pm 12\text{ V}$
- 共模抑制比: $> 83.5\text{ dB}$
- 输入等效RMS噪声:
 - 92 nV_{RMS} @ 1 kHz
 - 200 nV_{RMS} @ 5 kHz
 - 280 nV_{RMS} @ 10 kHz



抗混叠滤波器

➤ 基于集成滤波器芯片

生产厂商	芯片型号	上限截止频率 f_H 范围	禁带衰减	RMS噪声电平 ($\pm 2.5V$ 供电)
Linear Technology	LTC1064-3	最大95 kHz	-12.7 dB @ $2f_H$	45 μV_{rms}

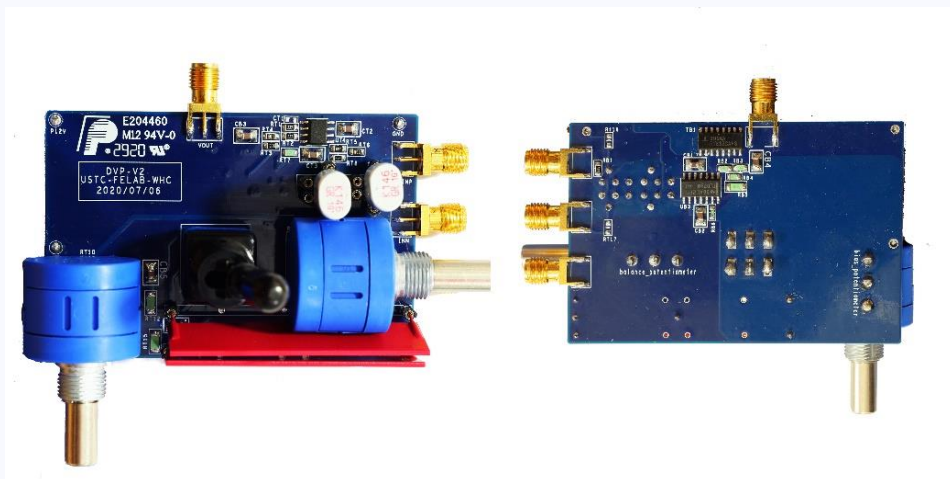
➤ 分立器件8阶模拟贝塞尔滤波器

- *Sallen - Key*型八阶滤波电路
- *MFB*型八阶全差分滤波电路

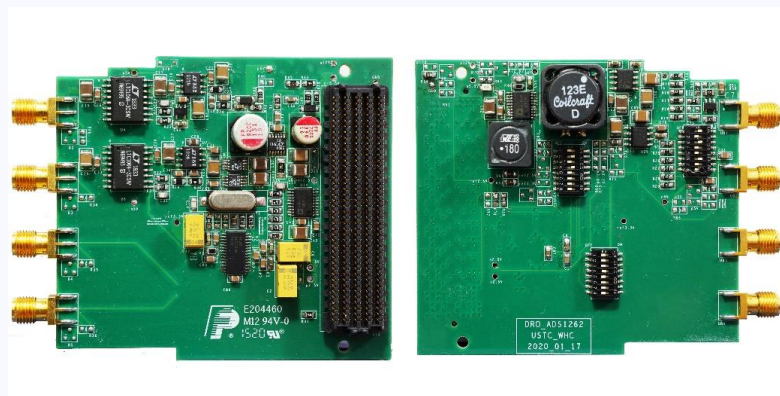
高精度模数转换电路

生产厂家	芯片型号	最高采样频率	量化位数	通道数	积分非线性	RMS噪声 (1 kSPS, 5 V)
Analog Devices	AD7177-2	10 kSPS	32 bits	4	1 ppm	0.77 μ Vrms
Analog Devices	AD7779	16 kSPS	24 bits	8	7 ppm	1.33 μ Vrms
Texas Instrument	ADS1262 / ADS1263	38 kSPS	32 bits	8	3 ppm	1.74 μ Vrms
Texas Instrument	ADS1281	4 kSPS	32 bits	2	0.6 ppm	2.23 μ Vrms
Texas Instrument	ADS1282	4 kSPS	32 bits	4	0.5 ppm	2.23 μ Vrms

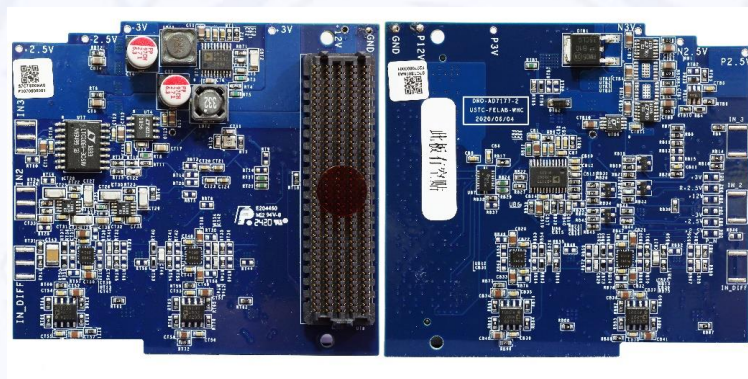
实现电路



直流偏置电路与前置放大电路板



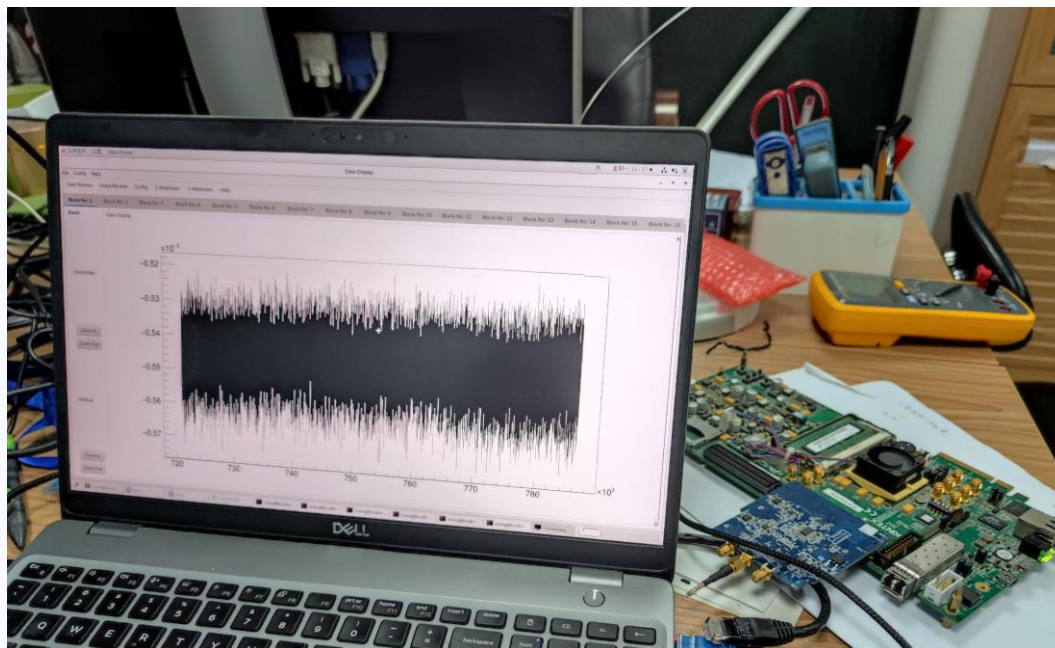
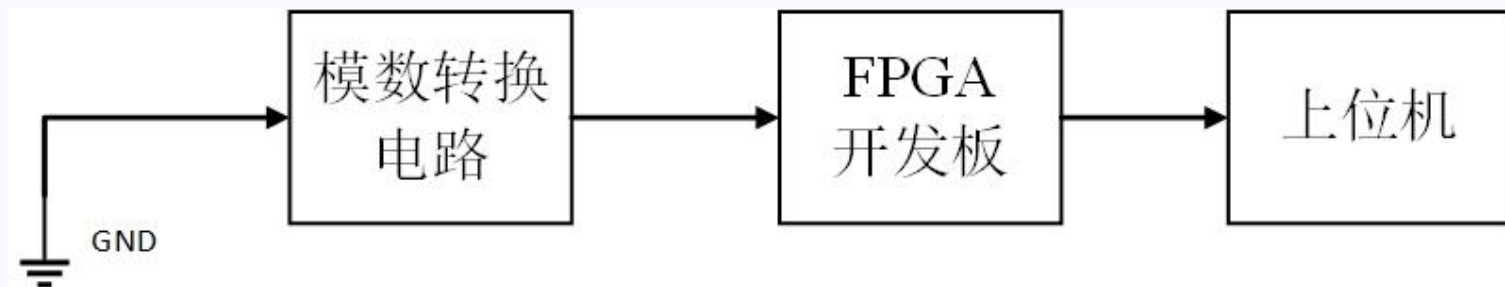
基于ADS1262的数字读出电路板



基于AD7177 - 2的数字读出电路板

电路测试与结论

➤ 模数转换电路测试



模数转换电路测试结果

➤ 基于ADS1262的模数转换电路

采样频率	RMS噪声 (标称值)	信噪比SNR	有效位数ENOB
7.2 kSPS	7.28 μ Vrms (5.33 μ Vrms)	116.74 dB	19.38 bits
14.4 kSPS	8.40 μ Vrms (6.38 μ Vrms)	115.50 dB	19.19 bits

➤ 基于AD7177 - 2的模数转换电路

采样频率	RMS噪声 (标称值)	信噪比SNR	有效位数ENOB
2.5 kSPS	1.39 μ Vrms (1.2 μ Vrms)	131.11 dB	21.78 bits
5 kSPS	1.99 μ Vrms (1.7 μ Vrms)	127.00 dB	21.26 bits
10 kSPS	2.91 μ Vrms (2.5 μ Vrms)	124.69 dB	20.71 bits

抗混叠滤波电路测试

抗混叠滤波电路频率响应测试框图



抗混叠滤波电路性能对比

滤波电路种类	RMS噪声	信噪比SNR	禁带衰减 (2倍 f_H)
集成滤波电路	56.48 μ Vrms	104.96 dB	-12 dB
Sallen-Key型滤波电路	7.92 μ Vrms	116 dB	-14.2 dB
MFB型滤波电路	62.49 μ Vrms	98.06 dB	-13.78 dB

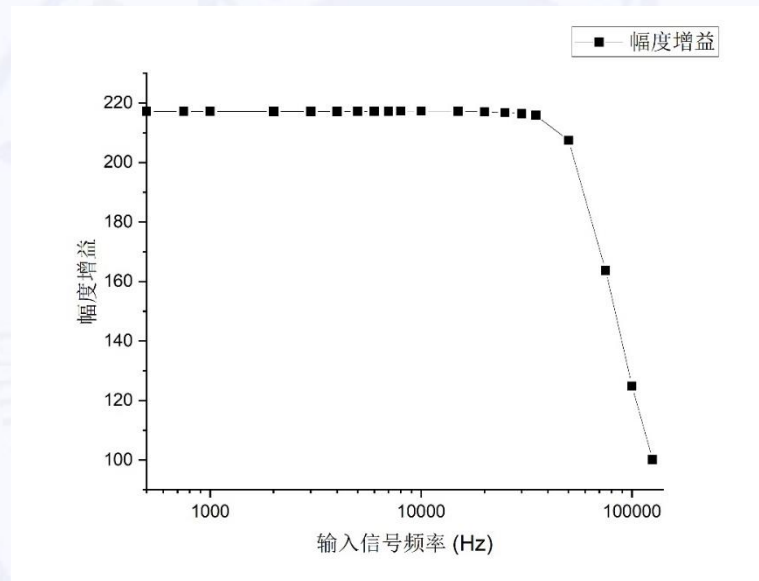
前置放大电路测试

➤ 幅频响应测试框图



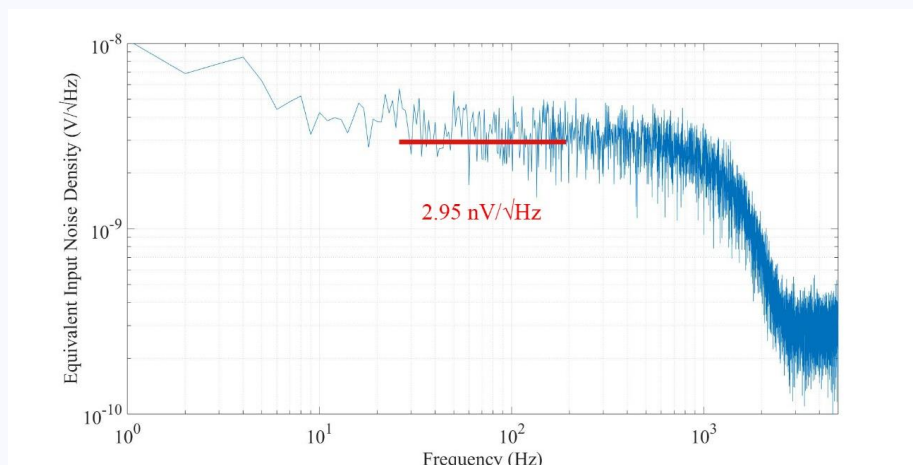
➤ 幅频响应测试结果

- 增益: 218 倍
- 5 kHz以内增益变化小于千分之一



前置放大电路测试

➤ 等效输入噪声频谱



➤ $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz; 频带内平均: $2.95 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

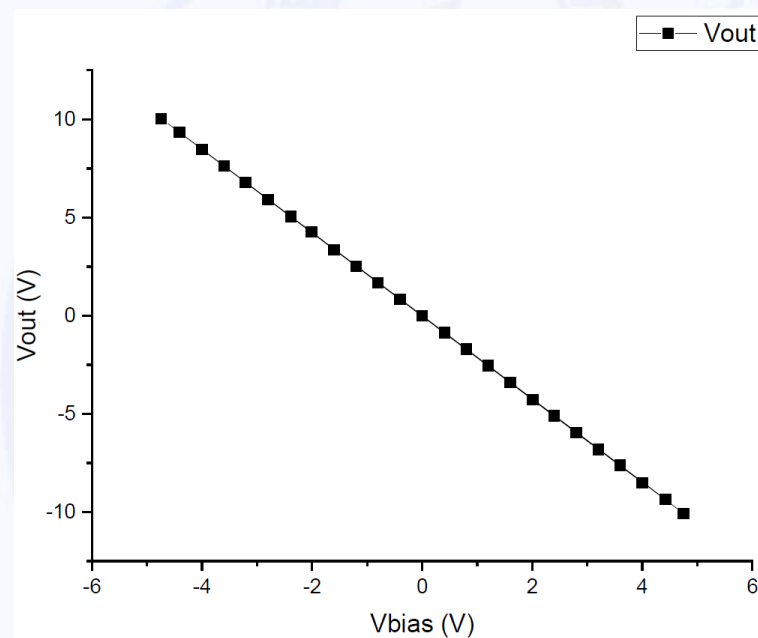
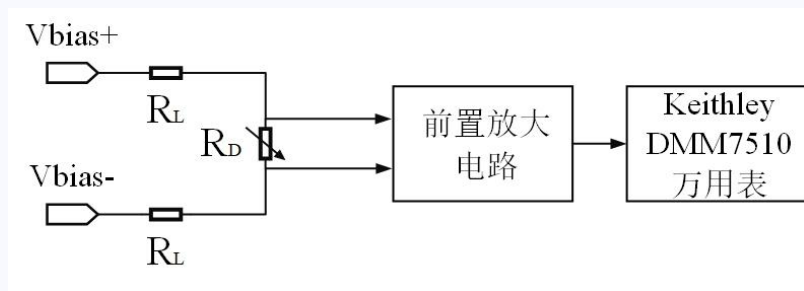
➤ RMS噪声

➤ 43.7 nVrms @ 120 Hz; 110 nVrms @ 1 kHz; 140 nVrms @ 5 kHz

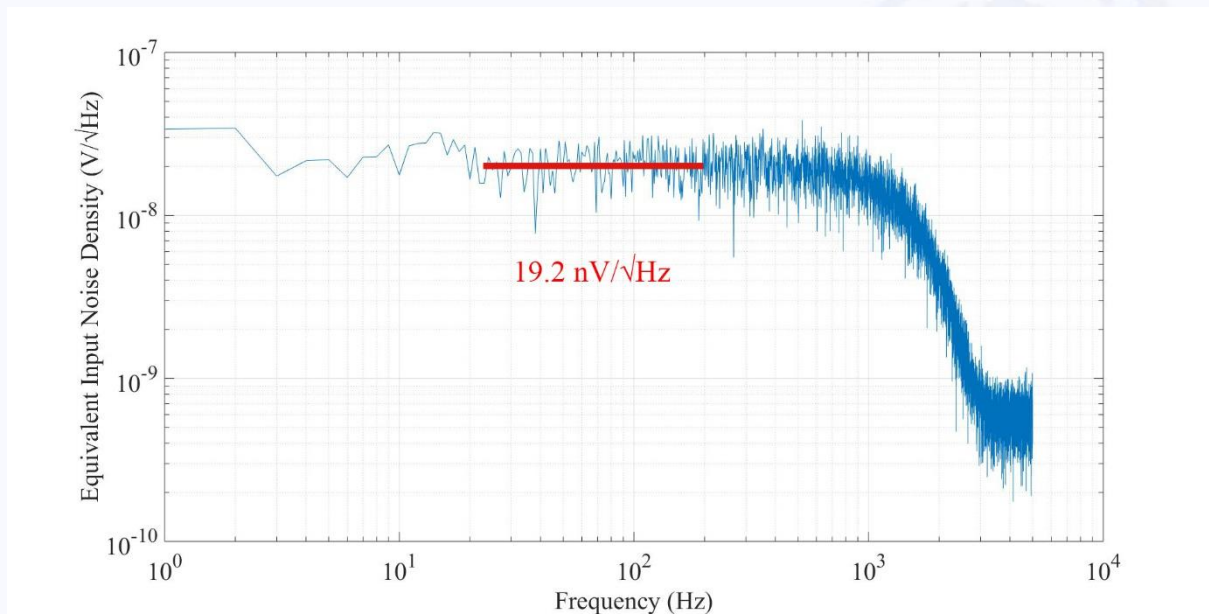
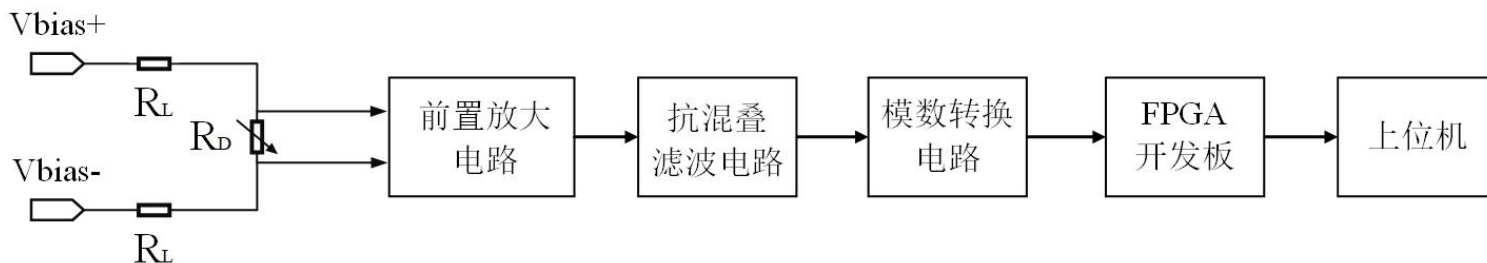
➤ 理想能量分辨率: 329 eV FWHM

偏置电路测试

- 电压范围：约-4.5 V到+4.5 V
- 电流范围：-0.2 nA到+0.2 nA
- 测得实际电阻：193.8 M Ω （标称200 M Ω ）



系统综合测试



报告提纲

- 低温微量热器读出电子学系统简况
- 2020年工作进展
- 下一步工作计划



下一步工作计划

- 直流偏置电路的优化
 - 利用数字电位器、数控开关代替机械电位器和开关
 - 低噪声、低漂移、高电源抑制比的直流电源的研究
- 微小电流测试方法
 - 对不同型号JFET漏电流的实际测试
 - 对实际前置放大电路输入电流的测试
- 前置放大电路的研究
 - 基于HEMT实现低温前置放大电路
 - 温度/基线补偿电路
 - 程控增益
- 电路模块的集成和探测器阵列的实现



谢谢大家！

