

一种红外探测器专用 77 K 工作 CMOS 前置放大器

袁红辉¹ 袁剑辉² 王京辉³

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 长沙理工大学物理与电子科学系, 长沙 410077)

(3 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 利用 single-ended folded-cascode 结构和 MOS 管工作在线性区做反馈电阻, 实现了一种在 77 K 工作的高性能低功耗、低噪声前置放大器. 分析了它的噪声特性, 提出了减少噪声的措施. 此前置放大器用 1.2 μm 的标准 CMOS 工艺制造完成. 经过测试, 这种前置放大器在低温 77 K 下能正常工作, 反馈电阻大小为兆欧级, 线性度达到了 1%, 等效输入噪声电流仅 0.03 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 功耗小于 1 mW.

关键词: CMOS; 低温; 低功耗; 低噪声; 前置放大器

EEACC: 2570D; 1220; 1205

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)04-0790-05

1 引言

目前航空航天技术领域里的红外探测器和前置放大器是分开封装的, 即红外探测器在低温 77 K 下工作, 而前置放大器在常温下工作^[1~5], 这种设计使探测到的信号在传输至前置放大器的过程中容易产生干扰, 引起噪声. 而探测信号一般很弱, 微小的干扰都会对探测器性能产生很大的影响. 随着航空航天技术的发展, 对红外探测器的性能提出了更高的要求, 为了能更好地发挥探测器性能水平, 降低探测信号传输到前置放大器过程的噪声干扰, 提高探测信号的信噪比, 要求实现探测器和前置放大器一同封装, 即前置放大器在低温 77 K 下也能正常工作. 目前国内尚未报道过针对低温 77 K 设计的前置放大器, 大部分前置放大器在温度降低到 77 K 时就已无法正常工作, 不能满足这种高性能探测器的要求. 另外由于受致冷功率的限制, 前置放大器的功耗不能大于 1 mW. 这样就对前置放大器的设计提出了更高的要求. 要求设计的前置放大器不仅能在低温

77 K 下正常工作, 而且功耗要小于 1 mW, 同时还要具有良好的噪声特性. 根据红外探测器的输出和后面系统的处理需要, 要求前置放大器的输入阻抗大于 100 M Ω , 输出阻抗小于 100 M Ω , 动态范围大于 50 dB, 灵敏度、失调等指标符合设计要求. 本文提出了一种新的设计方法, 利用 single-ended folded-cascode 结构和 MOS 管工作在线性区做反馈电阻, 实现了一种低温条件下工作的低功耗、低噪声的高性能前置放大器.

2 电路设计及原理

2.1 电路结构

前置放大电路采用单端折叠共源共栅 (single-ended folded-cascode) 结构, 如图 1 所示. 其中 M1 和 M3 构成共源共栅结构, M2 是电流源, M4 为有源负载, M5 和 M6 构成源极跟随, MF 做反馈电阻, 其余为偏置电路. 在此电路中, 输入管 M1 的偏置电压由 MF 提供. C_F 为反馈电容.

袁红辉 男, 1972 年出生, 硕士, 主要研究方向为模拟 CMOS 集成电路的设计与测试. Email: yuanhonghui@163.com

2004-05-21 收到, 2004-10-09 定稿

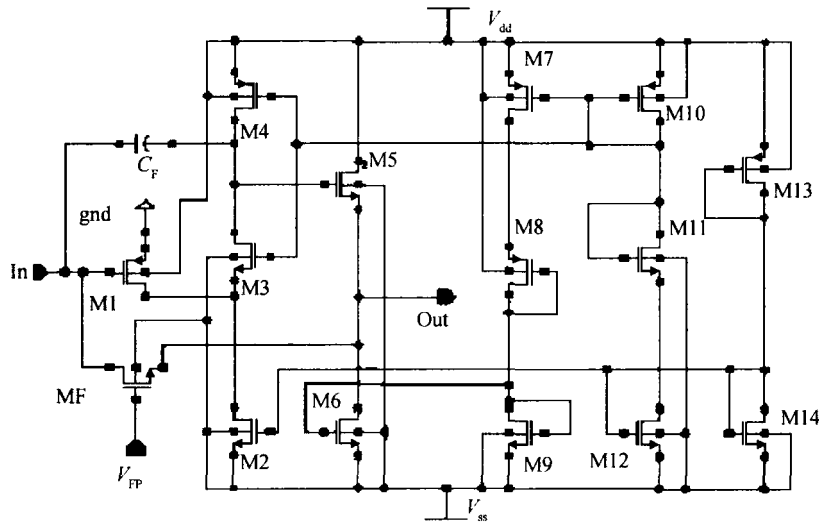


图 1 前置放大器电路结构

Fig. 1 Topologic circuit of the preamplifier

2.2 设计原理及仿真结果

此电路总的噪声主要由输入管 M1 决定^[6], 其等效输入噪声电压计算公式为:

$$S_{v_e}(f) = \frac{8}{3} \times \frac{kT}{g_m} + \frac{K_f}{C_{ox}^2 WL} \times \frac{1}{f}$$

其中 第 1 项为沟道热噪声, 第 2 项为 1/f 噪声;

g_m 为输入管 M1 的跨导, $g_m = \sqrt{2 K_p \frac{W}{L} I_{ds}}$, 为减小总噪声, 输入管 W/L 的大小及偏置电流的设计非常重要. 从以上公式可知, 增大 g_m 可以减小沟道热噪声. 在面积许可的条件下, 增大输入管的 W/L (采用 $1000\mu\text{m}/2\mu\text{m}$) 来增大 g_m , 在画版图时用 10 个 $100\mu\text{m}/2\mu\text{m}$ 的管子组成. 另外还可以通过调节偏置电流来增大输入管的电流 I_{ds} 从而增大 g_m . 在调节偏置时, 我们把 I_{ds} 调到 $100\mu\text{A}$ 以上, 这样可以很大程度上减少沟道热噪声. 但 I_{ds} 不能调得太大, 否则会由于电流过大而导致静态功耗增大, 所以电路表现出噪声和功耗的折中关系^[4].

pMOS 比 nMOS 的 $1/f$ 噪声小^[5], 所以输入管 M1 选 pMOS. 另外增大 W/L 也可以减小 $1/f$ 噪声, 在功耗和面积许可的条件下, 其他管子也尽可能考虑以低噪声标准来设计. 另外, 当温度降低时, 加大电流以及增加阈值电压 V_T 可能会使器件无法工作, 所以在设计每个管子的 W/L 时要充分考虑. 我们用 HSPICE 软件进行仿真, 使用的是贝岭公司的 $1.2\mu\text{m}$ BSIM3 器件模型, K_f 取 10^{-24} , 从仿真结果

看, 本电路的输出噪声电压很低, 如图 2 所示. 若取带宽为 10kHz , $0 \sim 10\text{kHz}$ 的总输出噪声电压仅为 $4.0338\mu\text{V}$.

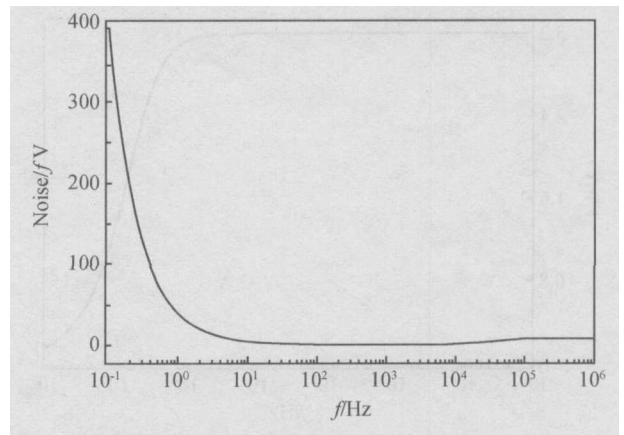


图 2 前置放大器噪声特性曲线

Fig. 2 Noise curve of the preamplifier

为减少封装管壳的引脚数, 降低串音干扰, 反馈电阻应集成在芯片里面, 并要求反馈电阻在 1M 以上. 若直接用多晶硅做电阻, 面积太大, 为减小面积, 我们使 MOS 管 MF 工作在可调电阻区, 即 $V_{GS} > V_T$ 和 $V_{DS} < V_{GS} - V_T$, 其电阻可达 1M 以上, 其计算公式^[7]为:

$$R_F = \frac{t_{ox} L}{\epsilon_{ox} \mu W} \times \frac{1}{V_{GS} - V_T} \quad (1)$$

从上式可看出电阻与 L/W 成正比, 而在 V_T 一定时与 V_{GS} 成反比, 调节 MF 的栅极 (V_{FP}) 电压可改变反馈电阻 R_F 的大小. 本电路已经设计了常

温下当栅极(V_{FP})接 0.6V 时,在探测器产生的电流为 1nA 的情况下,可以使输出电压在 3.2mV 左右,即反馈电阻的大小为 3.2M (见图 3)。

从仿真结果看,在正负电源电压为 2V 和 -2V 时,此电路的静态功耗为 363.5 μ W。随着温度降低,功耗增加,原因是温度降低时载流子漂移速率增大导致电流加大。

此电路采用的是 MOS 输入管,输入电阻在 10^{10} 左右,远大于 10^9 ,符合预期设计要求。输出部分采用源极跟随,减小了输出电阻,有利于与后级放大的匹配。

本前放电路的 3dB 带宽由反馈电阻 R_F 和反馈电容 C_F 决定,与反馈电阻和反馈电容的乘积成反比,即

$$f = \frac{1}{2} = \frac{1}{2 R_F C_F}$$

反馈电阻 R_F 太大会导致 3dB 带宽变小,通过仿真可以看到本电路的带宽大于 10kHz (见图 3),满足带宽设计要求。

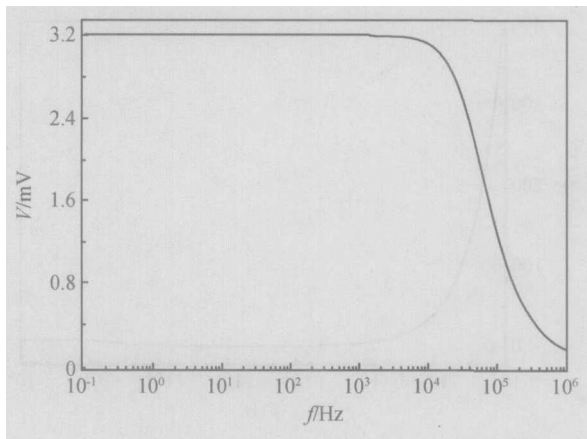


图 3 前置放大器幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristic of the pre-amplifier

由于缺乏低温 77K 的 MOS 晶体管参数模型,仿真软件最低只能达到 208K,通过比较 298K 和 208K 时两种情况可以得出,低温下输出电压减小到 2mV 左右,原因是反馈电阻 MF 减小所致,调节 MF 的栅极电压即通过改变 V_{GS} 来改变反馈电阻值,可以把输出电压调到 3.2mV 左右,所以从理论上可以推测电路在 77K 也能工作。

我们利用 Cadence 软件制作了这种前置放大器的版图,此芯片的大小在 1mm \times 1mm 左右,如图 4 所示,并在贝岭公司的 1.2 μ m 的标准 CMOS 工艺

线上进行了流片,流片完后对该芯片进行了测试。

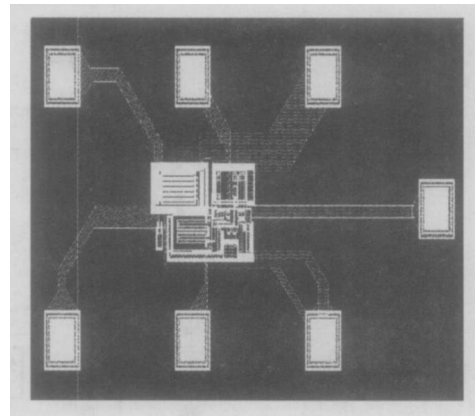


图 4 前置放大器显微放大照片

Fig. 4 Microphotograph of the preamplifier

3 测试结果及分析

3.1 线性度的测量

将芯片封装在杜瓦瓶后用液氮致冷(77K),待数据稳定后纪录数据。

测试时, $V_{FP} = 0.6V$, $V_{IN} = -1.2536V$,在 IN 端加 1~10nA 的电流,用示波器测试 OUT 端的电压变化情况,结果如表 1 所示。

表 1 输出电压与输入电流的关系

Table 1 Relationship between output voltage and input current

输入电流/nA	输出电压/V	V/mV
0	-1.2536	0
1	-1.2556	2.0
2	-1.2577	4.1
4	-1.2617	8.1
5	-1.2637	10.1
8	-1.2697	16.1
10	-1.2738	20.2

由以上数据可以看出,此前放在低温下能正常工作,线性度较好,其线性度的具体值为:(20.2 - 20/20 = 0.2)/20 = 1%,达到预期设计要求。增大 V_{FP} 还可以提高线性度,但反馈电阻将变小。

3.2 反馈电阻大小的测量

在低温 77K 下,反馈电阻与 V_{FP} 关系如表 2 所示。

计算公式为:

$$R_F = \frac{V}{I}$$

表 2 反馈电阻与 V_{FP} 的关系

Table 2 Results of feedback resistance depending on V_{FP}

V_{FP}/V	0	0.1	0.2	0.6	1.0	1.5
电阻大小/ 10^6	18.6	8.1	4.8	2.0	1.5	1.0

在低温 77 K 下,当 V_{FP} 的大小是 0.6 V 时,反馈电阻的大小为 2×10^6 ,反馈电阻随 V_{FP} 的增大而减小,符合公式(1)。

3.3 功耗测试

测出正电源的电流 (I_+) 和负电源的电流 (I_-),从而可得到该前置放大器的功耗 P_D 。

低温 77 K:

$$\begin{aligned} P_D &= V_+ I_+ + V_- I_- \\ &= 2V \times 220\mu A + 2V \times 80\mu A \\ &= 0.6mW \end{aligned}$$

常温:

$$\begin{aligned} P_D &= V_+ I_+ + V_- I_- \\ &= 2V \times 160\mu A + 2V \times 40\mu A \\ &= 0.4mW \end{aligned}$$

与仿真结果基本一致(仿真结果为 $363.5203\mu W$)。

低温下功耗比常温增大 0.2 mW 左右(常温为 0.4 mW),原因是温度降低时载流子漂移速率增大导致电流加大。低温功耗为 0.6 mW 已经小于了 1 mW,达到了预期设计要求。功耗随温度变化的曲线见图 5。

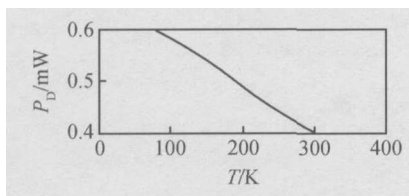


图 5 功耗与温度变化的关系

Fig. 5 Relationship between power consumption and temperature

3.4 噪声测试

利用锁相放大器,在 $V_{FP} = 0.6V$,无输入信号(测前置放大器的自身噪声)条件下测量噪声,测量的带宽为 0 ~ 10 kHz。结果表明,低温 77 K 时 0 ~ 10 kHz 总噪声大小为 $1.5\mu V$,常温时 0 ~ 10 kHz 总

噪声大小为 $5\mu V$ 。

所测常温噪声比仿真结果大(若 K_f 取 10^{-24} ,常温仿真结果的噪声是 $4.0338\mu V$),原因是实际噪声源比 HSPICEY 噪声模型中的噪声源复杂得多,另外屏蔽效果不理想也影响了测试结果。低温下的噪声比常温下的噪声小,原因是低温下沟道热噪声 $\frac{8}{3} \times \frac{kT}{g_m}$ 随温度的降低而下降。低温时等效输入噪声电流仅 $0.03pA/\sqrt{Hz}$,说明该电路已经具有了很好的噪声特性,具体的噪声频谱特性曲线,如图 6 所示。

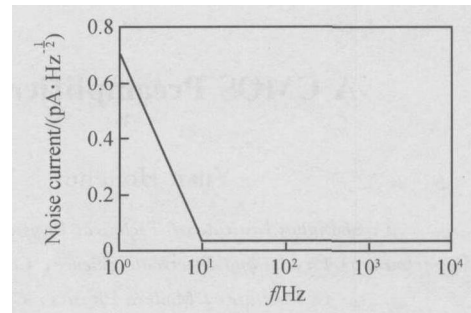


图 6 低温 77 K 下噪声频谱特性曲线

Fig. 6 Noise spectral density of the preamplifier at 77 K

3.5 前放与红外探测器匹配性能测试

将碲镉汞红外探测器与前放连接后封装在杜瓦瓶里,然后用液氮致冷,待温度稳定在 77 K 时进行了测试,信号能正常读出,噪声很小,匹配性能良好,整个系统能正常工作。

4 结论

设计了一种红外探测器专用 CMOS 低温、低功耗、低噪声、高输入阻抗前置放大器。经过测试,此前置放大器在低至 77 K 的温度下能正常工作,单元电路的静态功耗仅 0.6 mW,低温工作时等效输入噪声电流仅 $0.03pA/Hz^{1/2}$,输入阻抗大于 10^9 ,采用 MOS 管使其工作在线性区做反馈电阻,大大减小了芯片体积,每单元在 $1mm \times 1mm$ 左右,反馈电阻大小能达兆欧级,且线性度达到了 1%,该前放与红外探测器连接在一起后能正常工作,实现了探测器与前置放大器一同封装,减少了系统的总噪声。

参考文献

- [1] Wurtz L T ,Wheless W P Jr. Design of a high-performance , low noise charge preamplifier. IEEE Trans Circuits Syst , 1993 ,40(8) :541
- [2] Hu Y ,Solere J L ,Lachartre D ,et al. Design and performance of a low-noise ,low-power consumption CMOS charge amplifier for capacitive detectors. IEEE Trans Nucl Sci ,1998 ,45 (1) :119
- [3] Tedja S ,Van der Spiegel J ,Williams H H. A CMOS low-noise and low-power charge sampling integrated circuit for capacitive detector/ sensor interfaces. IEEE J Solid-State Circuits , 1995 ,30(2) :110
- [4] Hu Y ,Deptuch D ,Turchetta R ,et al. A low-noise ,low-power CMOS SOI readout front-end for silicon detectors leakage current compensation with capability. IEEE Trans Circuits Syst ,2001 ,48(8) :1022
- [5] Randazzo N ,Russo G V ,Presti D L ,et al. A four-channel , low-power CMOS charge preamplifier for silicon detectors with medium value of capacitance. IEEE Trans Nucl Sci , 1997 ,44(1) :31
- [6] Baker R J ,Li H W ,Boyce D E. CMOS circuit design ,layout , and simulation. New York :John Wiley ,1998
- [7] Razavi B. Design of analog CMOS integrated circuits. New York :McGraw-Hill ,2001

A CMOS Preamplifier Working at 77 K for IR Detectors

Yuan Honghui¹ , Yuan Jianhui² , and Wang Jinghui³

(1 Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China)

(2 Department of Physics and Electronic Science , Changsha University of Science & Technology , Changsha 410077 , China)

(3 Institute of Modern Physics , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

Abstract : A high-performance low-power low-noise preamplifier working at 77 K for IR detectors is designed by a single-ended folded-cascode structure and a MOS transistor operating in the linear region as feedback resistor. Its noise characteristics are analyzed and the methods for decreasing noise are put forward. This preamplifier is fabricated with 1.2 μ m CMOS technology. The test result shows that the preamplifier can work at 77 K, its feedback resistance is more than 10^6 Ω , its linearity reaches 1% , the equivalent input noise current is 0.03pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$, and the power consumption is less than 1mW.

Key words : CMOS , low temperature ; low-power ; low-noise ; preamplifier

EEACC : 2570D ; 1220 ; 1205

Article ID : 0253-4177(2005)04-0790-05

Yuan Honghui male , was born in 1972 , master. He is mainly engaged in research on the analog CMOS integrated circuit design and test.

Email : yuanhonghui @163.com

Received 21 May 2004 , revised manuscript received 9 October 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics