

文章编号:1001-5078(2009)10-1100-04

· 信号处理电路 ·

一种差分输入 HgCdTe 红外探测器专用电流读出电路的研制

袁红辉, 陈永平, 陈世军, 刘 强, 徐 星
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:利用差分输入的折叠共源共栅结构实现了一种在 77 K 工作的高性能低噪声 HgCdTe 红外探测器专用的电流读出电路。文中分析了它的噪声特性,并提出了减少噪声的措施。此电路用 1.2 μm 的标准 CMOS 工艺制造完成。经过测试,这种电流读出电路在低温 77 K 下能正常工作,反馈电阻大小为 41 M Ω ,等效输入噪声电流仅 0.03 pA/Hz^{1/2},连接 HgCdTe 红外探测器后能正常工作。

关键词:CMOS;低温;低噪声;电流读出电路

中图分类号:TN43 **文献标识码:**A

Fabrication of a difference input current readout circuit for HgCdTe IR detectors

YUAN Hong-hui, CHEN Yong-ping, CHEN Shi-jun, LIU Qiang, XU Xing
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A high-performance low-noise current readout circuit working at 77 K for IR detectors is designed by using a folded-cascode structure. Its noise characteristics were analyzed and the methods for decreasing noise were put forward. This circuit was fabricated in 1.2 μm CMOS technology. The test result shows that the circuit can work at the temperature of 77 K, its feedback resistance was 41 $\times 10^6 \Omega$, the equivalent input noise current is 0.03 pA/Hz^{1/2}.

Key words: CMOS; low temperature; low-noise; current readout circuit

1 引言

红外探测器和低噪声微弱电流读出电路是气象卫星遥感的核心部件。为降低探测器的读出噪声,理想的方式是电流读出电路与红外探测器一起进行低温集成封装。然而,目前的电流读出电路都不具备低温 77 K 工作能力,因此,国内在遥感系统中仍然采用红外探测器和电流读出电路远距离分开连接的工作方式,即 HgCdTe 红外探测器在深低温下工作,而电流读出电路在常温下工作。这种设计使得探测器输出的极微弱信号在传输至电流读出电路的过程中产生干扰,引入很大的附加噪声,限制了系统灵敏度的提高。我们已经研制出了单端输入结构的低温红外探测器专用 77 K 前置放大器^[1-3],由于中长波红外探测器本身的工作方式要求工作在零偏,单端输入的前置放大器存在输入偏置电压,需要

外加抵消电压使探测器工作在零偏,增大了附加噪声,降低了系统的可靠性,而差分输入的电流读出电路很容易满足红外探测器工作在零偏。因此差分输入液氮工作温度的微弱电流读出电路的研制对于高性能红外探测器集成组件、深低温红外焦平面及高灵敏红外遥感系统的研制都具有极其重要的战略和现实意义。

2 电路结构及特征

本电路的结构如图 1 所示,采用折叠共源共栅结构。其中, M1 和 M2 是输入对管, M1, M2, M3, M4 构成差分输入的共源共栅结构, M5, M6 为差分输出

基金项目:上海市科委国际科技合作项目(No.09530708500)资助。
作者简介:袁红辉(1972-),男,硕士,主要研究方向为模拟 CMOS 集成电路的设计与测试。E-mail:yuanhonghui@163.com
收稿日期:2009-04-09;修订日期:2009-05-26

的有源负载, M7, M8 给共源共栅提供电流源, RF 做反馈电阻, CF 为反馈电容, M9 ~ M16 为偏置电路, M17, M18 为源极跟随。

本电路的特征如下:

1) 该电流读出电路采用高阻多晶硅做反馈电阻, 能使低温 41 MΩ 的反馈电阻集成在芯片里面, 能直接把红外探测器的电流信号转化为电压信号,

克服了在外面加反馈电阻引入外来噪声源的缺点。

2) 电路采用标准 CMOS 工艺制造而成, 保证了芯片制造的可靠性及重复性。

3) 该电路在常温 300 K 和低温 77 K 都能正常工作, 可用于各种波段光伏红外探测器的信号放大。

4) 该电路在 ±2 V 和 ±1.5 V 之间的工作电压都能正常工作。

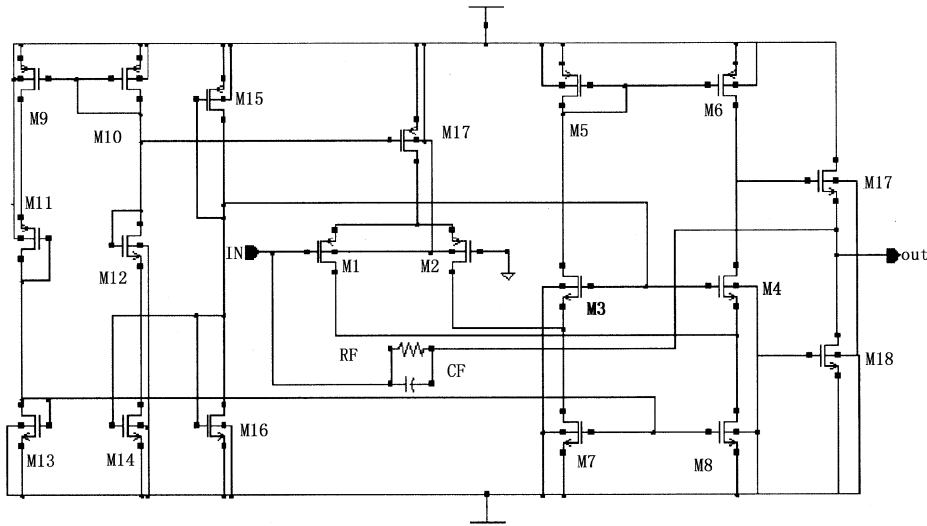


图1 电流读出电路结构

Fig.1 topologic circuit of current readout

该电路的版图是在上海贝岭 1.2 μm 2P2M 高阻多晶硅工艺上制作的, 反馈电阻利用方块电阻为 2 kΩ 的高阻多晶硅实现。总个版图的面积是 3 mm × 1.9 mm, 为四路放大, 如图 2 所示。

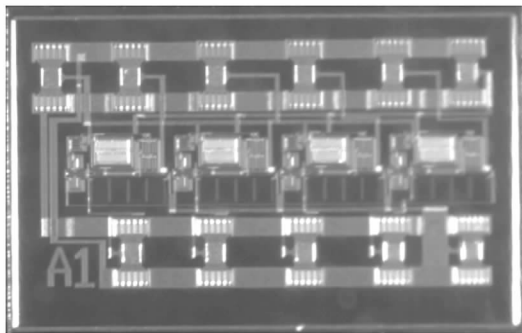


图2 电流读出电路显微放大照片

Fig.2 microphotograph of current readout circuit

3 电路设计原理及仿真结果

此电路总的噪声主要由输入管 M1, M2 管决定, 其等效输入噪声电压计算公式为^[4-6]:

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

其中, $g_m = \sqrt{2K_p \frac{W}{L} I_{ds}}$ 。式中, 第一项为沟道热噪声;

第二项为 1/f 噪声。g_m 为输入管的跨导, 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, 尽量增大输入管的 W/L, 本电路采用 1500 μm/1.5 μm 的输入对管来增大 g_m, 在画版图时用 72 个 41.7 μm/1.5 μm 的管子组成输入对管 M1, M2, 且在输入对管的外面使用了保护环, 如图 3 所示, 有利于减少输入对管的失调及外界串扰进来噪声^[7-9]。另外, 还可以通过调节偏置电流来增大输入管的电流 I_{ds} 来增大 g_m, 在调节偏置时,

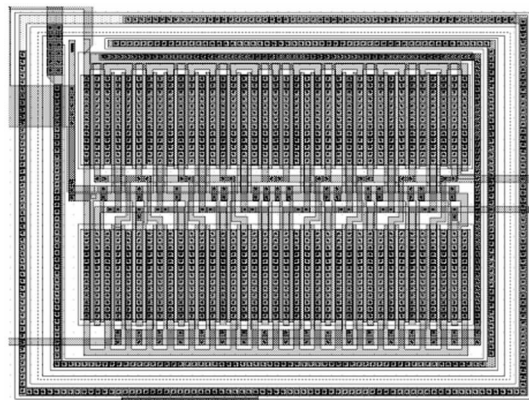


图3 PMOS 输入管的版图

Fig.3 layout of pmos input transistor

我们把 I_{ds} 调到 80 μA 左右,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。

PMOS 比 NMOS 的 $1/f$ 噪声小^[10],所以输入管 M1, M2 选 PMOS 减小了 $1/f$ 噪声。另外,增大 $W \times L$ 还可以减小 $1/f$ 噪声,在功耗和面积许可的条件下,其他管子也尽可能考虑低噪声标准来设计。当温度降低时电流加大以及域值电压 V_T 增加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。

整个电路结构采用差分输入的共源共栅结构,提高了输出阻抗,使该电路一级放大就能达到 60 dB 以上的放大倍数,克服了普通的两级放大器在低温下容易振荡的缺点。由于放大器采用的是共源共栅结构,大大提高了电路的电源电压抑制比,减小了系统总的噪声。几乎所有的低温红外探测器都是在零偏下工作,差分输入单端输出的放大器结构很好的解决了这个问题。

我们用 HSPICE 软件进行仿真,使用的是贝岭公司的 1.2 μm BSIM3 器件模型,从仿真结果看,本电路的输出噪声电压很低(如图 4 所示)。若取带宽为 10 kHz, 0 ~ 10 kHz 的总输出噪声电压大约为 50 μV , 因反馈电阻大小为 17 M Ω , 所以可以计算出等效输入总电流大小为 3 pA, 点频输入电流噪声为 $0.03 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

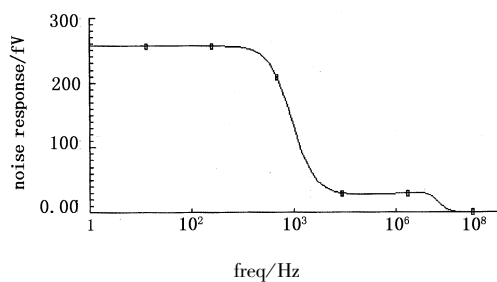


图4 电流读出电路噪声特性曲线

Fig. 4 noise curve of current readout circuit

电路在设计时,输入端与输出端增加了 1 pF 的反馈电容 CF(如图 1 所示),目的是消除放大器 100 kHz 以上的高频振荡。

为减少封装管壳的引脚数,降低串音干扰,反馈电阻集成在芯片里面,反馈电阻采用高阻多晶硅做电阻,电路芯片的面积为在 3 mm \times 1.9 mm(如图 2 所示),有效的减小了芯片总面积。

4 电路的测试及分析

差分输入微弱电流读出电路的噪声测试如下:

测试仪器:EG & G 124 A 锁相放大器。

测试方法:

1) 测试点频噪声时:MODE 选 BANDPASS, Q 值选 100。

设测试的频率点为 f ,测得的噪声电压为 V ,则该频点的噪声电压密度 $V_n = \frac{V}{\sqrt{1.57 \times f \div Q}}$ 。

2) 测试通频带噪声时,MODE 选 LOWPASS, Q 值选 1,通过设置截止频率点 f_c ,可直接获得 0.2 Hz ~ f_c 频带内的总噪声。

测试结果如表 1 所示。

表 1 测试结果

	0.2 Hz ~ 1.6 kHz 总等效输入噪声电流	点噪声
常温 300 K	1.4 pA	0.03 pA/Hz ^{1/2} @ 1 kHz
低温 77 K	1 pA	0.025 pA/Hz ^{1/2} @ 1 kHz

从上面的噪声测试结果可以看出,前面采用的减少噪声的方法得当,效果很明显。

因一般的代工厂提供的仿真模型其最低温度只能达到 200 K 左右,无法进行低温 77 K 仿真,在低温下阈值电压及其他一些相关参数都要发生变化,我们针对贝岭 1.2 μm 工艺,把常温模型阈值电压及迁移率进行了适当的改变,模拟 77 K 温度的电路基本性能,测试结果显示,电路的主要性能测试结果和仿真结果基本吻合:如低温的单元静态功耗仿真值为 0.32 mW,测试值也为 0.32 mW;输出电压摆幅仿真值为 1.3 V,而输出电压摆幅的测试值也为 1.3 V。这些结果对我们今后进行低温电路的设计提供了最简单的行之有效的方法。

参考电流源级由 M9 ~ M16 构成, M15, M16 为基准电流,由 M16 镜像到 M14 产生一路电流,再由 M10 镜像到 M9 产生另外一路电流,该电流源没有使用对温度特别敏感的电阻,显示常温下偏置电路的偏置电流为 2.2 μA ,低温下偏置电路的偏置电流为 3.5 μA ,放大器在这种偏置电流范围下完全能正常工作。也显示该放大器的电流源温度抑制能力很强,整个微弱电流读出电路工作温度范围很宽,从常温 300 K 到低温 77 K 都能正常工作。

低温微弱电流读出电路的 3 dB 带宽由反馈电阻 RF 和反馈电容 CF 共同决定,与反馈电阻 RF 和反馈电容 CF 的乘积成反比,即: $f = \frac{1}{2\pi\tau} =$

$\frac{1}{2\pi RF \times CF}$,反馈电阻 RF, CF 太大会导致 3 dB 带宽

变小,本低温微弱电流读出电路设计的反馈电阻在低温 77 K 下为 41 M Ω ,反馈电容大小为 1 pF,通过低温 77 K 带宽测试,结果如图 5 所示,低温的 3 dB 带宽为 5.5 kHz 左右,满足红外探测器在低温 77 K 工作的正常要求。

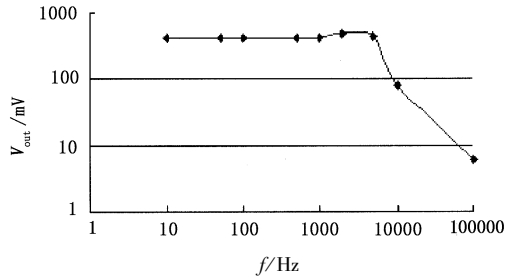


图 5 电流读出电路的频幅特性

Fig.5 amplitude-frequency characteristic of current readout circuit

在画电路版图时,所有的对管都采用叉指晶体管,尽量保证上下和左右对称(如图 3 所示),这样可以减小电路输入端失调,测试结果表明电路的输入失调电压很小,常温为 -1.9 mV,液氮 77 K 温度为 -2.1 mV。

由于该电路采用了折叠共源共栅结构。工作电压范围较大,在 ± 2 V 和 ± 1.5 V 之间都能正常工作。工作电压的不同导致了单元功耗的不同,在液氮温度 77 K 下的测试结果如表 2 所示。

表 2 功耗与电压的关系

Tab.2 the relationship between power consumption and voltage

供电电压/V	± 2	± 1.8	± 1.7	± 1.6	± 1.5
单元功耗/mW	1.3	1.0	0.75	0.50	0.32

随着供电电压的降低,单元功耗明显变小,根据功耗的要求可以选择不同的供电电压。

将碲镉汞红外探测器与电路连接后封装在杜瓦瓶里,然后用液氮制冷,待温度稳定在 77 K 时进行测试,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。

5 结论

设计了一种差分输入的红外探测器专用 CMOS 低温、低噪声、高输入阻抗电流读出电路。经过测试,此电路在低至 77 K 的温度下能正常工作,低温工作时等效输入噪声电流仅 0.03 pA/Hz^{1/2},采用方块电阻为 2 k Ω 的高阻多晶硅做反馈电阻,大大减小了芯片体积,整个电路芯片的面积在 3 mm \times 1.9 mm 左右,

反馈电阻大小达 41 M Ω ,该电流读出电路与 HgCdTe 红外探测器连接在一起后能正常工作,实现了探测器与电流读出电路一同封装,减少了系统总的噪声,为实现高性能探测系统在航空航天领域地应用奠定了重要的基础。

参考文献:

- [1] Yuan Honghui, Yuan Jianhui, Wang Jing Hui. A CMOS preamplifier working at 77 K for IR detectors [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2005 (4): 790 - 794. (in Chinese)
- [2] Yuan Honghui, Wang Ganquan, Chen Yongping, et al. A low-power low-noise minitype preamplifier working at utmost lower temperature [J]. Infrared And Laser Engineering, 2006 (4): 432 - 436. (in Chinese)
- [3] Hong-hui Yuan, Yong-ping Chen. Design and performance of a preamplifier for HgCdTe IR detectors [C]. ICSICT-2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Shanghai, 2006: 983 - 985.
- [4] Wurtz L T, Wheless W P, et al. Design of a high-performance, low noise charge preamplifier [J]. IEEE Trans. Circuits Syst. I., 1993, 40 (8): 541 - 545.
- [5] Y Hu, J L Solere, D Lachartre, et al. Design and performance of a low-noise, low-power consumption CMOS charge amplifier for capacitive detectors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45 (1): 119.
- [6] Suharli Tedja, Jan Van der Spiegel, Hugh H Williams. A CMOS low-noise and low-power charge sampling integrated circuit for capacitive detector/sensor interfaces [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 1995, 30 (2): 110.
- [7] Y Hu, G Deptuch, R Turchetta, et al. A low-noise, low-power CMOS SOI readout front-end for silicon detectors leakage current compensation with capability [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48 (8): 1022.
- [8] N Randazzo, G V Russo, D Lo Presti, et al. A four-channel, low-power CMOS charge preamplifier for silicon detectors with medium value of capacitance [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997, 44 (1): 31.
- [9] R Jacob Baker, Harry W Li, David E Boyce. CMOS circuit design, layout, and simulation [M]. New York: John Wiley, 1998.
- [10] Behzad Razavi. Design of analog CMOS integrated circuits [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.