

二极管非制冷红外探测器及其读出电路设计

祖秋艳¹, 王玮冰^{1,2}, 黄卓磊¹, 何鑫^{1,2}, 陈大鹏¹

(1. 中国科学院微电子研究所 中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029;
2. 江苏物联网研究发展中心, 江苏 无锡 214315)

摘要: 针对非制冷红外技术的低成本高性能应用, 提出了基于 SOI 的二极管红外探测器及其读出电路的集成设计方案。阐述了二极管非制冷红外探测器的基本原理和工艺实现。对探测器的电学特性进行理论推导, 得出读出电路的设计指标。采用连续时间自稳零电路结构实现探测器输出信号的低噪声低失调放大, 采用级联滤波器以减弱开关非理想因素的影响, 并采用片内电容采样保持, 使得 I/O 引脚数较少, 从而减小版图面积。采用 spectre 工具进行仿真, 在 CSMC 0.5 μm 2P3M CMOS 工艺下实现。结果表明: 读出电路性能良好, 闭环增益为 65.8 dB, 等效输入噪声谱密度为 $450 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 等效输入失调电压 100 μV 以内, 功耗为 5 mW, 能实现探测器信号的准确读出。

关键词: 二极管非制冷红外探测器; 自稳零技术; 低噪声; 低失调; 读出电路
中图分类号: TN43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1680-05

Uncooled diode infrared detector and design of its readout interface circuit

Zu Qiuyan¹, Wang Weibing^{1,2}, Huang Zhuolei¹, He Xin^{1,2}, Chen Dapeng¹

(1. Key Laboratory of Microelectronics Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China; 2. JiangSu R&D Center For Internet of Things, Wuxi 214315, China)

Abstract: A design for integration of diode infrared detectors based on SOI and its readout interface circuit was presented for the low cost and high performance applications of uncooled infrared technology. Basic principle and fabrication technology of uncooled diode infrared detectors were elaborated. Through theoretical derivation of the electrical characteristics of detectors, circuit design specifications were given. The circuit used continuous time auto-zero technique to reduce offset voltage and suppress low frequency noise. It amplified the signals and cascaded a filter to decrease effects of non-ideal switches. Capacitors in chip were chosen to sample and hold, and as a result, the layout of the circuit had fewer I/O pads and smaller area. It was simulated using spectre tool and fabricated in CSMC 0.5 μm 2P3M CMOS process. Experimental results show that this circuit has a good performance, achieving a closed-loop gain of 65.8 dB, equivalent input noise power spectral density of $450 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, equivalent input offset voltage smaller than 100 μV and power consumption of 5 mW, can accurately read out the outputs of detectors.

Key words: uncooled diode infrared detector; auto-zero; low noise; low offset; readout interface circuit

收稿日期: 2012-11-07; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室基金(Y2ZR16X001)

作者简介: 祖秋艳(1987-), 女, 硕士, 主要从事模拟集成电路设计方面的研究。Email: zuqiuyan@ime.ac.cn

0 引言

随着红外传感技术在军事和民用领域越来越广泛的应用,低成本的非制冷红外探测技术的研究引起了各国的重视。

非制冷红外探测器利用红外辐射的热效应进行探测。红外吸收材料吸收红外辐射,将其转换为热能,引起敏感元件温度上升,它的某个物理参数随之发生变化,进而转化为电信号。二极管红外探测器作为非制冷红外探测器的一种,利用半导体 PN 结正向偏置电压随温度变化的特性来探测红外辐射。目前对此项技术研究较为成功的科研单位主要有日本的三菱电子公司和土耳其的中东技术大学电气与电子工程系。三菱公司基于 SOI 硅片及干法刻蚀技术制作了二极管非制冷红外探测器。中东技术大学电气与电子工程系则采用湿法腐蚀技术及普通单晶硅片制作。前者性能更优,后者则成本更低。

文中对基于 SOI 的二极管型非制冷红外探测器及其信号读出电路设计进行详细讨论,为实现探测器和读出电路单片集成的低成本高性能微型化红外探测系统打下基础。

已经研制好的基于 CMOS 标准工艺和 MEMS 工艺的 SOI 二极管红外探测器^[1-2],产生的电压信号幅度小,频率低。失调电压和低频处的电路噪声将对信号的读出产生干扰。读出电路的性能优劣直接影响系统的灵敏度和动态范围。通常要求读出电路具有较高的增益,低的等效输入噪声,并且能较大幅度地降低直流失调电压。连续时间自稳零技术是一种降低失调电压和抑制低频噪声的有效方法。

1 基本原理

1.1 基于 SOI 的二极管红外探测器

二极管型非制冷红外探测器的 PN 结具有良好的温度特性,其正向电压随温度升高而降低。因而通过测量二极管两端的电压降变化可以探测出探测器的温度变化,进而得到入射到探测器的红外辐射强度。采用标准 CMOS 工艺和少量相对兼容的 MEMS 工艺制作二极管型红外探测器,基于 SOI 技术降低热导以提高探测率,并通过多个二极管串联提高探测器的电压温度灵敏度^[1]。

从电路设计的角度,笔者最为关心信号的分辨率和信号的特征频率。对应到二极管红外探测器的具体指标,则为电压温度灵敏度和响应时间。

对于理想的单晶硅二极管正向偏置,只考虑扩散电流,不考虑势垒区的复合电流、欧姆接触电阻和引线电阻等因素。在小注入情况下,固定偏置电流,分析其电压-温度特性。流过二极管的电流密度与其两端的电压之间的关系为:

$$J = J_s [\exp(qV/k_0T) - 1] \quad (1)$$

式中: J_s 为反向饱和电流密度。

$$J_s = CT^{3+\gamma/2} \exp(-E_g/k_0T) \quad (2)$$

式中: C 为与温度无关的量,忽略 E_g 随温度的变化,将公式(2)代入公式(1),并求导得:

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V}{T} - \frac{(3+\gamma/2)k_0}{q} - \frac{E_g}{qT} \quad (3)$$

当温度 T 取 300 K 时,硅的禁带宽度 $E_g = 1.119$ eV,设 PN 结的正向电压降为 0.8 V, $\gamma = 0$,则单个二极管的电压温度灵敏度为:

$$dV/dT = -1.32 \text{ mV/K} \quad (4)$$

参考文献[1]中基于 SOI 的二极管红外探测器串联 6 个二极管,电压温度灵敏度为 7.92 mV/K。当入射红外辐射流密度较小使得探测器中心敏感区域温升仅为 0.1 K 左右时,输出电压仅为 0.792 mV。

作为热红外探测器,基于 SOI 的二极管红外探测器的响应时间主要由热响应时间决定,为 ms 级。所以探测器输出的为低频信号。

可见,读出电路必须具有低噪低失调的特性,以保证能对 mV 级别以下的微弱慢变信号进行放大及滤波处理。

1.2 连续时间自稳零技术

连续时间自稳零技术是失调稳定技术的一种。它能有效地降低失调电压和低频噪声。失调稳定技术^[3]的基本原理如图 1 所示。

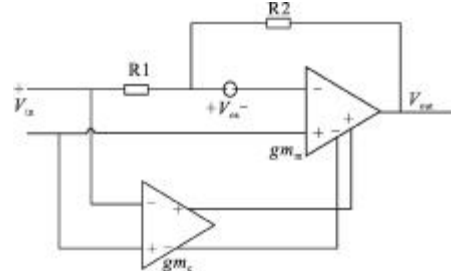


图 1 失调稳定技术原理

Fig.1 Principle of offset stabilization

在一个负反馈结构中,引入一个低失调的补偿运放。从等效输入失调的定义出发,

$$(V_{in+} - V_{in-}) \cdot A_n A_m' + (V_{in+} - V_{in-} + V_{os}) \cdot A_m = V_{out} \quad (5)$$

当 $V_{out} = 0$ 时正负输入端的差值即为等效输入失调。

$$V_{offset} \approx (A_m/A_n A_m') V_{os} \quad (6)$$

式中: A_m 和 A_n 分别为主运放和补偿运放的主输入端到输出端的增益; A_m' 为主运放的辅助输入端到输出端的增益。通过选择合适的 A_m 、 A_n 和 A_m' , 即能实现失调的降低。

将图 1 中的低失调补偿运放用自稳零来实现, 即为图 2 的连续时间自稳零放大器^[4]。

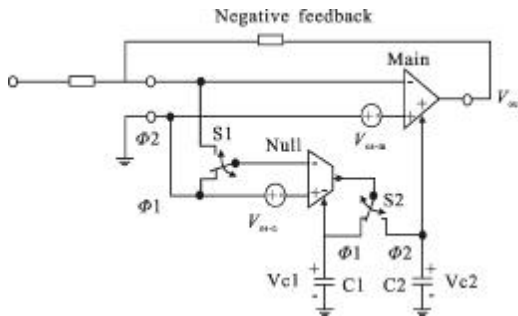


图 2 连续时间自稳零放大器
Fig.2 Continuous time auto-zero amplifier

在时钟相位 1 期间, 采样电容 C_1 将补偿运放的失调电压暂存在辅助输入端; 在时钟相位 2 期间, 补偿运放的自身失调电压通过辅助输入端进行校零, 同时, 补偿运放输出一个修正电压到主运放的辅助输入端, 强制主运放的两输入端电压相等, 从而消除主运放的失调电压。让 $\alpha_m = A_m/A_m'$, $\alpha_n = A_n/A_n'$, 则主运放的最大等效输入失调电压为:

$$V_{os}^{max} = \frac{\left(\frac{\alpha_m}{\alpha_n}\right) V_{osm}^{max} + V_{osn}^{max}}{A_n'} + \frac{\Delta V_{c_m}}{\alpha_m} + \frac{\Delta V_{c_n}}{\alpha_n} \quad (7)$$

V_{osm}^{max} 和 V_{osn}^{max} 分别为主运放和补偿运放本身的最大等效输入失调电压。 ΔV_{c_m} 和 ΔV_{c_n} 分别为主运放和补偿运放的采样保持电容上由于电荷注入、采样开关噪声和漏电流等引起的电压误差。

若 $\alpha_m = \alpha_n = \alpha$, 则有

$$V_{os}^{max} = \frac{V_{osm}^{max} + V_{osn}^{max}}{A_n'} + \frac{\Delta V_{c_m}}{\alpha} + \frac{\Delta V_{c_n}}{\alpha} \quad (8)$$

可见, 通过提高补偿运放辅助输入端到输出端的开环增益, 可以有效降低电路的等效输入失调。

连续时间自稳零电路的主要优点是: 通过引入

补偿运放使信号路径变为两条, 主运放始终未曾断开过, 所以信号可以通过主运放保持连续放大; 同时由于主运放信号路径并没有进行采样, 开关或调制引入的非理想因素对带宽的限制主要体现在补偿运放上, 从而使得主运放依旧能保持适中的速度。它的缺点也不容忽视。首先, 电路中开关采样会导致噪声的混叠; 其次, 要最大限度地降低开关非理想因素产生的残余失调, 则要求保持电容越大越好, 而大电容又难以片内集成。

2 电路设计

2.1 读出电路结构

读出电路结构如图 3 所示。第一级的运算放大器采用上文提到的连续时间自稳零运放, 用 2.5pF 的芯片级采样保持电容, 实现信号的低噪声低失调预放大; 第二级的片内低通滤波器进一步放大信号的同时降低时钟馈通、电荷注入等开关非理想因素的影响。

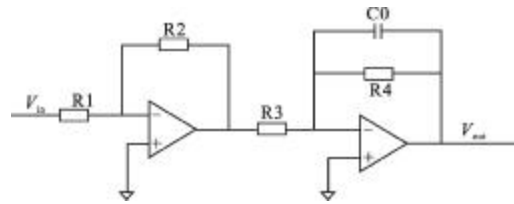


图 3 连续时间自稳零读出电路
Fig.3 Continuous time auto-zero readout circuit

2.2 连续时间自稳零放大器

连续时间自稳零放大器由内部放大器和采样/保持电路组成。

2.2.1 内部放大器结构

补偿运放采用折叠式共源共栅电路, 在传统的折叠式共源共栅放大器基础上加上辅助输入端^[5-6], 如图 4 所示。

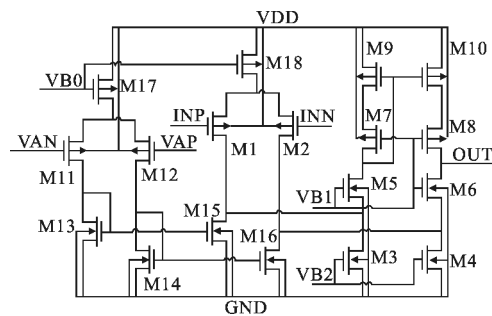


图 4 补偿运放电路

Fig.4 Schematic of nulling amplifier

图 4 中主输入端和辅助输入端是两个由差分对构成的跨导器，共用共源共栅输出级。输入管 M1、M11 的跨导分别为 g_{m1} 、 g_{m11} ，电流镜 M13、M15 的尺寸比为 K ， R_{out} 为输出阻抗。则有：

$$A_n = g_{m1} R_{out} \quad A_n' = (1/K) g_{m11} R_{out} \quad (9)$$

$$\alpha_n = \frac{A_n}{A_n'} = K \frac{g_{m1}}{g_{m11}} \quad (10)$$

主运放输入级采用和补偿运放相同的结构，另外加一级输出级以提高对负载的驱动能力。因此， $\alpha_m = \alpha_n = \alpha$ 。由公式(8)可知， α 越大，电荷注入、采样开关噪声和漏电流等非理想因素对失调的影响越小。另一方面， α 越大，图 3 电路所能降低的最大失调电压则越小。因此， α 的取值应该适中，文中取 50。

2.2.2 采样/保持

Ivars G. Finvers 通过对连续时间自稳零电路建模进行噪声分析^[7]，得出以下结论：该电路对低频噪声的抑制性能主要取决于补偿运放的带宽和采样时钟频率。要较好地降低低频噪声，则要求采用较高的时钟频率和较高的补偿运放带宽（一般通过采用较小的采样保持电容来实现）。而利用连续时间自稳零电路降低失调电压时，通常需要采用较大的采样保持电容来降低开关的电荷注入效应以及较低的时钟频率来保证信号的正确建立。所以，在低噪低失调的要求下，需要折中选择合适的采样保持电容大小和时钟频率。

3 仿真结果

图 3 连续时间自稳零读出电路中，取 $R2/R1=100$ ， $R4/R3=20$ ，时钟频率 $f_{clk}=14.28$ kHz。

(1) 对电路中放大器的基本性能进行仿真，结果如表 1 所示。

表 1 放大器的基本性能

Tab.1 Basic performance of amplifiers

Performance	Value
GBW of the main amplifier (load capacitance is 2.5 pF)	10 MHz
A_m of the main amplifier	110 dB
A_m' of the main amplifier	75 dB
A_n of the null amplifier	87 dB
A_n' of the null amplifier	52 dB
Open-loop gain of the filter amplifier	84 dB
GBW of the filter amplifier (load capacitance is 15 pF, load resistance is 2 kΩ)	8 MHz

(2) 对失调电压进行仿真，结果如表 2 所示。 V_{os} 为加在主运放输入端的失调电压， V_{os}' 为主运放输入端失调电压经连续时间自稳零电路进行失调降低后的等效输入失调电压。

表 2 失调降低的仿真结果

Tab.2 Results of offset cancellation

Item	Value				
V_{os}/mV	13	3	5	7	9
$V_{os}'/\mu V$	-17	-15.95	-29.3	-49	-77.5
V_{os}/mV	-1	-3	-5	-7	-9
$V_{os}'/\mu V$	17.8	16.15	31.2	44.35	75.35

(3) 输入幅值为 $100 \mu V$ ，频率 100 Hz 的正弦信号，负载为 $2 k\Omega//15 pF$ ，输出波形如图 5 所示。

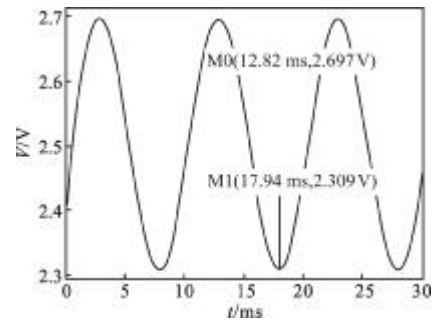


图 5 正弦信号瞬态仿真结果

Fig.5 Transient analysis of sinusoidal signal

可见， $100 \mu V$ 的正弦信号能放大至 194 mV。

(4) Pnoise analysis 得到等效输入噪声功率谱密度曲线如图 6 所示。

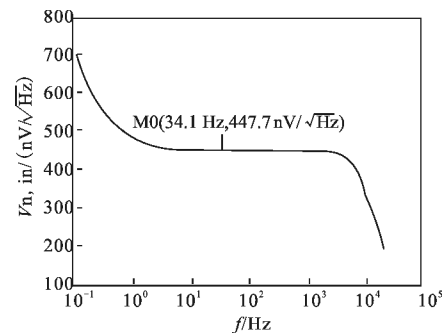


图 6 读出电路的噪声分析

Fig.6 Noise analysis of the readout circuit

查看噪声报告，得 1~1 kHz 的频带范围内，等效输入噪声功率谱密度为 $450 nV/\sqrt{Hz}$ 。

仿真结果显示：设计的连续时间自稳零读出电路既一定程度降低了失调电压，又较好地抑制了低

频噪声。针对探测器输出的幅值仅为数百微伏的电压信号,读出电路能将其准确放大至数百毫伏,以方便后续电路进一步处理。

4 实验数据

参考文献[1]中已经研制好的基于 SOI 的二极管型集成红外探测器单元结构如图 7 (a) 所示,在 SOI 薄膜上制作 6 个串联二极管组成红外吸收面,采用浅槽隔离技术实现二极管之间电隔离。探测器输出的微弱慢变电压信号可通过设计的连续时间自稳零低噪低失调电路准确读出。电路的版图照片如图 7(b)所示。采用 Virtuoso 工具,依据 CSMC 0.5 μm 2P3M CMOS 工艺设计规则进行版图设计。布局布线中主要考虑了对称性、时钟串扰、面积限制、闩锁效应等因素。

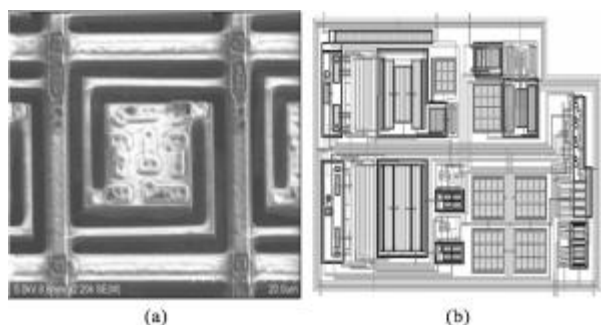


图 7 SOI 二极管型探测器电镜照片和读出电路的版图

Fig.7 Electron micrograph of the SOI diode detector and layout of readout circuit

5 结论

文中分析了基于 SOI 的二极管非制冷红外探测器的工作原理和关键指标,并完成了低噪声低失调读出电路的设计。与传统自稳零电路不同,该电路采用片内电容采样保持,并通过滤波器减弱开关非理想因素的影响,实现全集成型读出。电路在 CSMC

0.5 μm 2P3M CMOS 工艺,电源电压 $V_{DD}=5\text{V}$ 下实现。芯片 core 面积为 0.168mm^2 ,功耗为 5mW 。二极管红外探测器输出的微弱电压信号经由低噪声低失调读出电路可准确放大到接近 A/D 转换器的量程范围,便于后续 A/D 电路进一步处理,为探测器和读出电路的集成设计提供了可行性方案。

参考文献:

- [1] Wang Weibing, Chen Dapeng, Ming Anjie, et al. Integration of uncooled diode infrared focal plane array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 997-1000. (in Chinese)
王玮冰, 陈大鹏, 明安杰, 等. 二极管原理非制冷红外焦平面阵列的集成设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 997-1000.
- [2] He Wei, Chen Dapeng, Ming Anjie, et al. Diode infrared detectors based on SOI Si wafers [J]. *Nanoelectronic Device & Technology*, 2009, 46(9): 525-529. (in Chinese)
何伟, 陈大鹏, 明安杰, 等. 基于 SOI Si 片的二极管红外探测器[J]. *微纳器件与技术*, 2009, 46(9): 525-529.
- [3] Witte Johan F, Makinwa KOFI A A, Huijsing Johan H. A CMOS chopper offset-stabilized opamp [J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2007, 42(7): 360-363.
- [4] Enz C C, Temes G C. Circuit techniques for reducing the effects of opamp imperfections: autozeroing, correlated double sampling, and chopper stabilization [J]. *IEEE*, 1996, 84(11): 1584-1614.
- [5] Behzad Razavi. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* [M]. Boston: McGraw-Hill, 2001: 376-389.
- [6] Daniel Dzahini, Hamid Ghazlane. Auto-zero stabilized CMOS amplifiers for very low voltage or current offset [C]//*IEEE Nuclear Science Symposium*, 2003(1): 6-10.
- [7] Finvers Ivars G, Haslett James W, Finvers Ivars G, et al. Noise analysis of a continuous-time auto-zeroed amplifier [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 1996, 43(12): 791-800.