

改进型电流镜积分红外探测器读出电路设计

李 伟^{1,2}, 赵毅强¹, 孙 权¹, 檀柏梅²

(1. 天津大学专用集成电路设计中心, 天津 300072; 2. 河北工业大学微电子研究所, 天津 300130)

摘要:介绍了一种基于电流镜积分(CMI)的红外探测器的读出电路,运用宽摆幅自偏置电流镜结构对CMI电路进行了改进,该结构由宽摆幅自偏置P型折叠共源共栅电流镜与N型电流镜反馈结构组成,在提高电流镜工作稳定性的同时,基本读出单元功耗降低了 $3.3\mu\text{W}$ 。详细分析了电路的结构、工作原理和设计过程,并采用Chartered $0.35\mu\text{m}$ 工艺进行了功能仿真和版图设计。结果表明,该改进型电路结构可以实现从 30pA 到 4.5nA 的积分,精度达到9位。

关键词:红外读出电路;电流镜积分;自偏置电流镜

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

An Improved Current Mirroring Integration IR ROIC Design

LI Wei^{1,2}, ZHAO Yi-qiang¹, SUN Quan¹, TAN Bai-mei²

(1. ASIC Design Center, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Institute of Microelectronics, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: This paper presents the readout circuit applied in Infrared Detector signal processing circuit. The basic readout circuit unit is designed with an improved current mirroring integration (CMI) architecture, namely using the wide-output-swing and self-biased current mirror to optimize the traditional CMI circuit. This structure uses a high-swing self-bias P-type cascode current mirroring and an N-type current mirroring forming the feedback structure which greatly enhances the stability of the current mirror, the power dissipation of the basic readout circuit unit is reduced by $3.3\mu\text{W}$. A detailed analysis of the improved CMI circuit with its architecture, working principle as well as design process is carried out in this paper. The total circuit is simulated and implemented using Chartered $0.35\mu\text{m}$ integrated technology. The simulation results indicate that the CMI circuit successfully completes the current integrating function with the current from 30pA to 4.5nA and meets the 9-bit accuracy.

Key words: infrared readout integrated circuit; CMI; self-cascoded current mirror

1 引言

在过去几十年里,红外成像技术被广泛应用到军事、民用、科研等众多领域^[1]。由于Si的截止波长小,几乎所有的红外探测器都是非硅材料,以MCT, InSb等化合物半导体材料为主,其在制作工艺上很难与CMOS工艺兼容,红外图像信号处理系统通常采用分立电路,但是,CMOS工艺是目前集成电路的主流工艺,其最突出的优点就是单片集成,随着技术的发展和系统分辨率的提高,单片集成智能处理电路必将得到巨大发展。

读出电路是信号处理电路的关键单元,一种高

性能的读出电路结构需要满足:与探测器的良好匹配,极低的噪声,高的注入效率^[2]。

读出电路通常可分为基本读出单元,列读出级和输出缓冲级,在基本读出单元设计中,一些读出电路结构,如早期的直接注入结构(direct injection, DI),后来的缓冲直接注入(buffered direct injection, BDI),电容反馈互阻抗放大器(capacitive trans-im-

作者简介:李 伟(1982-),男,硕士生,主要从事模拟集成电路设计。E-mail: jerryjay189@126.com

收稿日期:2008-07-18

pedance amplifier, CTIA) 等在某些方面具有优势,但也存在局限性^[3],例如 DI 结构在低背景下,因注入管的跨导减小,使读出电路的输入阻抗增大,会降低光生电流的注入效率,同时由于注入管阈值电压的不均匀性,会在焦平面阵列输出信号中引入空间噪声;再如 CTIA 结构,其电路的功耗和芯片面积较一般的电路大,复位开关也会带来 KT/C 噪声等。本文以 256 元光电探测器读出电路为背景,采用改进型的电流镜像积分 (current mirroring integration, CMI) 读出电路结构,使用了自偏置启动机制,并且结合像素版图整体设计,既保证高注入效率,稳定偏置,良好匹配,同时由于像素级的结构简单又可以降低功耗。

2 读出电路的结构设计

该信号处理电路芯片主要由读出电路、信号处理电路、模数转换器和数字控制电路组成。其中,前端读出电路主要由电流镜像积分 (CMI)、相关双采样电路 (CDS) 和输出缓冲器 (Buffer) 组成,图 1 中给出了读出电路的总体结构。

其中电流镜像积分电路 (CMI) 完成从光电流到电压的转化,并采用并行曝光模式,将低噪声积分放大的信号输出到 CDS, CDS 消除其固定模式噪声 (FPN) 和抑制像素复位噪声、 $1/f$ 噪声,之后通过 Buffer 增强对后续电路的驱动能力。

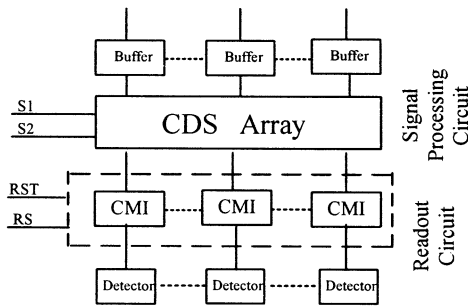


图 1 读出电路的总体结构

3 读出电路的电路设计与分析

由于红外辐射的能量弱,红外探测器的输出电流很小,通常为 pA 到 nA 量级,尤其这种小信号很易受到其他噪声的干扰这就要求读出电路具有较高的灵敏度,CMI 结构具有注入效率高、探测器直流偏置稳定、信噪比高等优点,所以单元电路采用 CMI 结构^[4]。

3.1 改进型 CMI 电路结构及工作原理介绍

图 2 中给出了 CMI 的电路图。其像素单元较简单,由 $M_1 \sim M_9$ 九个晶体管组成,相对于像素单元中包含放大器的读出电路而言,功耗得到了降低。其中 $M_1 \sim M_8$ 组成宽摆幅自偏置电流镜放大电路, M_9 为行选管,提供行选连续工作方式,以串行的

工作模式依次选通每行的单元电路。积分电容 C_{int} 和复位开关 R_{st} 置于像素单元之外,从而节省了面积提高了信噪比 (SNR),输出缓冲级由 M_{10}, M_{11} 组成的源跟随器实现。

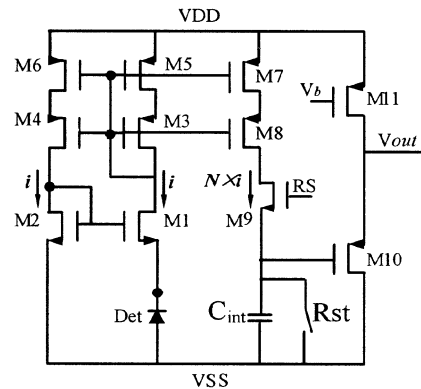


图 2 改进型 CMI 电路图

CMI 电路的工作原理:电路开始工作,当行选管 M_9 被选通,复位开关 R_{st} 闭合,积分电容两端电压被复位到零,光电二极管探测器探测光照并产生的电流,随着光强变化探测电流也产生相应变化,探测电流流过晶体管 M_1 ,再通过晶体管 $M_3 \sim M_6$ 组成的宽摆幅自偏置共源共栅电流镜镜像到晶体管 M_2 , M_1 和 M_2 同样也是电流镜方式连接,则探测电流又被镜像反馈到 M_1 ,保证了探测器两端偏置稳定,同时探测电流通过晶体管 M_7, M_8 镜像到积分电容 C_{int} 上,为了提高电路的精度和 SNR,通过调整晶体管的尺寸,使得探测电流放大 N 倍。积分后 C_{int} 上的电压为 $V_0 = i_N * t / C_{int}$,其中 i_N 为经过倍放大后的探测电流, t 为积分时间。再经由输出缓冲级将存储在 C_{int} 上的电压 (包含噪声) 输送到下一级处理电路,至此,CMI 一个单元的电路完成了一个周期的工作。

图 3 给出了其边积分边读出信号的驱动脉冲工作时序示意图。其中 Clock 信号控制整个电路工作,周期为 $500\mu s$,RS 信号控制行选通, R_{st} 为复位信号。

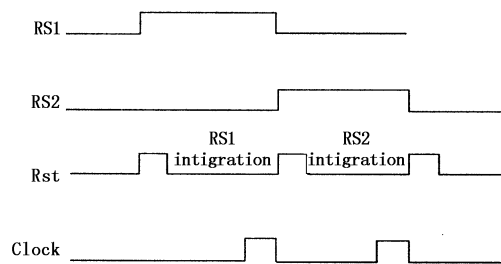


图 3 读出电路驱动脉冲工作时序示意图

3.2 CMI 像素级的设计与分析

为了方便分析 CMI 结构的性能参数,其简化后电路结构如图 4 所示,光伏探测器由二极管表示,电阻 R 和电容 C_d 表示探测器自身的寄生参数。

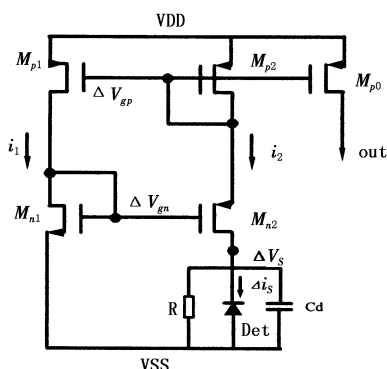


图4 CMI简化电路图

探测器探测到的电流为皮安(pA)到纳安(nA)级,故CMI单元电路中的各个晶体管应工作在弱反型区,借助晶体管工作在弱反型时的模型,电流-电压特性可以描述为:

$$I_D \approx \left(\frac{W}{L}\right) \cdot I_{D0} \cdot \exp\left[\frac{V_{GS} - V_T^*}{n(KT/q)}\right] \quad (1)$$

式中, K 称为几何常数,弱反型区工作的管子, $(V_{GS} - V_T^*) \approx 0$,则式(1)可近似化为:

$$I_D \approx K(V_{GS} - V_T^*)$$

则图4中, I_1, I_2 可以表示为:

$$I_1 = K_{P1}(V_{GP} - V_{TP1}^*) = K_{N1}(V_{GN} - V_{TN1}^*)$$

$$I_2 = K_{P2}(V_{GP} - V_{TP2}^*) = K_{N2}(V_{GN} - V_{TN2}^* - V_{Det})$$

由上边两式可得到出探测器的两端的偏置电压为:

$$V_{Det} = \frac{K_{P2}}{K_{N2}} \left(\frac{I_1}{K_{P1}} + \Delta V_{TP}\right) + \frac{I_1}{K_{N1}} + \Delta V_{TN}$$

令 $K_{N1} = K_{N2} = K_N; K_{P1} = K_{P2} = K_P$; 可得:

$$V_{Det} = \frac{K_P}{K_N} \Delta V_{TP} + \Delta V_{TN} \quad (2)$$

由式(2)看出,探测器两端的偏压 V_{Det} 仅由晶体管的阈值电压失配决定。若几何常数 K_P, K_N 相等,则 V_{Det} 对于典型CMOS工艺而言只有几毫伏,保证了探测器两端直流偏置稳定且接近于零,很好地减小了暗电流和探测器噪声。

该结构的另外一个优点是可以提供很低的输入阻抗,其输入阻抗可由等效跨导推导,如图4所示,光生电流改变 ΔI_S 引起的电压变化为 ΔV_S ,则 M_{n2} 的跨导可以表示为:

$$g_{mn2} = \frac{\Delta I_S}{\Delta V_{gn} - \Delta V_S} \quad (3)$$

又 $\Delta I_S = \Delta I_2$, ΔI_2 将引起 M_{p1} 的栅极电压改变 ΔV_{gp} ,同时产生 ΔI_1 ,而 ΔI_1 又会导致 M_{n1} 的栅极电压改变 ΔV_{gn} ,那么 ΔV_{gn} 可以表示为:

$$\Delta V_{gn} = \frac{g_{mp1}}{g_{mg2}} \cdot \frac{g_{mn2}}{g_{mn1}} \cdot (\Delta V_{gp} - \Delta V_S)$$

若定义 $r = \frac{g_{mp1}}{g_{mg2}} \cdot \frac{g_{mn2}}{g_{mn1}}$,则上式可化为:

$$\Delta V_{gn} = \frac{r}{r-1} \cdot \Delta V_S \quad (4)$$

由式(3)和式(4)得该结构输入阻抗:

$$R_{in} = \frac{\Delta V_S}{\Delta I_S} = \frac{r-1}{g_{mn2}}$$

则注入效率公式可化为:

$$\eta_{in} = \frac{R_D}{R_D + R_{in}} = \frac{R_D}{R_D + \frac{r-1}{g_{mn2}}} \quad (5)$$

R_D 为动态电阻,由式(5)可知 r 值越小,注入效率越高,而 r 值只与晶体管的跨导有关,在现有工艺条件下,可以通过使用适当的版图技术,尽可能将共栅晶体管做到匹配,使得 r 尽可能的接近1,以保证高的注入效率。

此外,复位开关 R_{st} 的时钟馈通效应可能会影响到镜像电流及积分后的输出,这个问题可以通过晶体管匹配提高电流镜镜像能力得到弥补。

3.3 宽摆幅自偏置电流镜的设计与分析

为了提高CMI在电流匹配时的工作稳定性和降低功耗,采用宽摆幅自偏置电流镜结构对传统CMI电路进行改进,该结构由宽摆幅自偏置P型折叠共源共栅电流镜与N型电流镜组成的反馈结构组成,对应图2中的 $M_3 \sim M_6$,从而克服了文献[5]中传统CMI读出电路电流镜偏置需片外提供的不足,由于CMI结构中各晶体管工作在弱反型区,漏极电流随 V_{GS} 指数变化,采用自偏置电流镜结构可有效地减少片外偏置引起的误差,电流镜工作稳定性也得到提高,同时这种改进由于减少一个为电流镜提供偏置的电压信号,当电源电压为3.3V,偏置电流为 $1\mu A$ 时,基本读出单元功耗降低 $3.3\mu W$ 。

如图5所示,探测电流 i_{det} 流过二极管连接的 M_1, M_2 产生偏置电压 V_{Gate} , V_{Gate} 为晶体管 M_3, M_4 统一提供偏置电压,从而省去外供偏压,形成了自偏置宽摆幅电流镜^[6]。具体设计时,在保持 M_1, M_2 具有相同沟道宽度的前提下,要使 M_1 的沟道长度 L_1 比 M_2 的沟道长度 L_2 长,即: $L_1 > L_2$ 。晶体管 M_3, M_4 与 M_1, M_2 具有相同的尺寸关系。

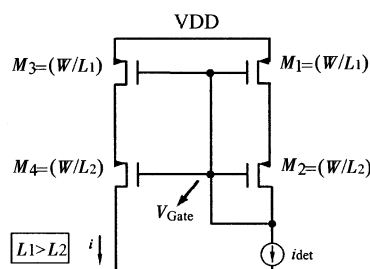


图5 自偏置电流镜工作电路图

该电流镜结构正常工作需满足的条件为:

$$V_{T1} - V_{T2} = V_{ON2} \quad (6)$$

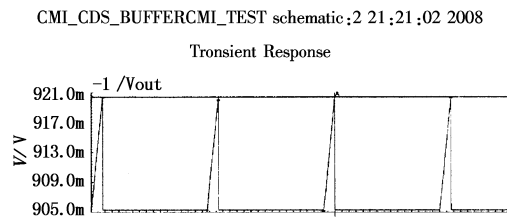
其中, V_{T1} , V_{T2} 分别为 M_1 , M_2 的阈值电压, V_{ON2} 为 M_2 的饱和电压。

此外,为了让镜像电流更为准确,沟道长度应设置大一些,以减少沟道调制效应。

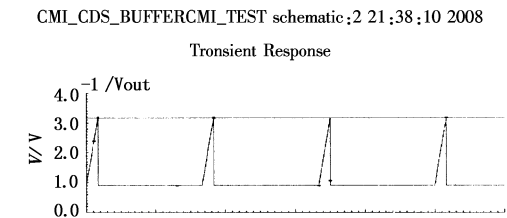
4 仿真及结果分析

本文中所设计电路采用 Chartered 0.35 μm 2P4M CMOS 工艺,仿真模型为 BSIM 3V3 Spice,使用 Spectre 仿真工具。

图 6 给出 SPECTUR 对 CMI 仿真结果。其中光生电流 $i = 30\text{pA}$ 和 4.5nA , 电流镜增益 $N = 10$, 积分时间 $t = 50\mu\text{s}$, 光电探测器等效模型中电阻取 1000M , 电容取 1pF , 而积分电容 C_{int} 选取很重要, 电容值越大, 电容产生的噪声电子数随之增大, 电路灵敏度下降; 容值太小当积分电流太大时, 非线性失真将增加, 两方面因素折中考虑选取 C_{int} 值为 1pF 。



(a) 光生电流为 30pA , V_{out} 输出波形



(b) 光生电流为 4.5nA , V_{out} 输出波形

图 6 CMI 输出特性曲线

光生电流从 $30\text{pA} \sim 4.5\text{nA}$ 变化时, 仿真数据如表 1 所示, 数据分析可得 CMI 模块积分功能正确, 线性较好, 理论积分值与实际仿真值相差小于 2mV , 精度可以达到 9 位精度。

表 1 CMI 仿真结果

电流/nA	理论值/V	仿真值/V
0.03	0.92033	0.920413
0.15	0.98033	0.981434
0.6	1.205329	1.20618
1	1.40533	1.40691
2.5	2.15533	2.15722
4.5	3.155329	3.15711

5 256 元测试芯片的版图

图 7 是电路单元通道版图, 版图设计采用 Cadence Virtuoso Editing 绘制, 尺寸大小为 $48\mu\text{m} \times 348\mu\text{m}$, 包括 CMI 模块, CDS 模块和 Buffer 模块。芯片将采用 Chartered 公司 $0.35\mu\text{m}2\text{P4M}$ N 阱 CMOS 工艺进行流片验证。



图 7 CMI 读出电路单元通道电路版图

6 总结

针对红外探测器读出电路, 本文详细分析了 CMI 读出电路的工作原理和设计过程, 在此基础上运用宽摆幅自偏置电流镜结构对传统 CMI 电路进行了改进, 该结构由宽摆幅自偏置 P 型折叠共源共栅电流镜与 N 型电流镜反馈结构组成, 并对电路进行了功能仿真和版图设计, 仿真结果表明该结构优势较为明显, 改进后的 CMI 模块积分的功能良好, 每个基本读出单元功耗降低 $3.3\mu\text{W}$, 精度可达到 9 位, 适合应用于长线列信号处理电路中。

参考文献:

- [1] 孙志君. 红外焦平面阵列技术的发展现状[J]. 半导体光电, 2002, 21(增刊): 29-32.
- [2] Watabe T, Goto M, Ohtake H, et al. A new readout circuit for an ultrahigh sensitivity CMOS image sensor[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2002, 48(3): 394-399.
- [3] C C Hsieh, C Y Wu, F W Jin, et al. Focal-plane-arrays and CMOS readout techniques of infrared imaging systems [J]. IEEE transactions on circuits and systems for Video Technology, 1997, 7(4): 594-605.
- [4] H Kulah, T Akin. ACMOS current mirroring integration readout structure for infrared focal plane arrays [J]. European Solid-State Circuits Conference. The Hague, The Netherlands, Sept., 1998, 468-471.
- [5] Murat Tepegöz, Tayfun AKIN. A readout circuit for QWIP infrared detector arrays using current mirroring integration [J]. Middle East Technical University. Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey.
- [6] I Fujimori, T Sugimoto. A 1.5V, 4.1mW dual-channel audio. delta-sigma audio D/A converter [J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 1998, 33: 1863-1870.