

边积分边读出低噪声红外焦平面读出电路研究

黄张成^{1,2}, 黄松奎^{1,2}, 张伟^{1,2}, 陈郁¹, 方家熊¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:设计了一款低噪声 InGaAs 焦平面读出电路. 提出一种新型相关双采样电路结构, 可在边积分边读出模式下有效抑制积分电容(0.15 pF)的 KTC 噪声. 电路经 0.5 μm 5 V Nwell CMOS 工艺流片, 测试结果符合设计目标, 在高帧频边积分边读出模式下工作状态良好, 电路噪声约 1.7×10^{-4} V, 动态范围大于 80 dB.

关键词:红外焦平面; 读出电路; 边积分边读出; 相关双采样

中图分类号: TN402 **文献标识码:** A

Low noise readout circuit for infrared focal plane array: in integration while read

HUANG Zhang-Cheng^{1,2}, HUANG Song-Lei^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Yu¹, FANG Jia-Xiong¹

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: InGaAs shortwave infrared focal plane array (FPA) has important application in space remote sensing. In this paper, a new design of readout integrated circuit (ROIC) is presented for a low-noise InGaAs FPA. In order to promote the signal-to-noise ratio, a new correlated double sampling (CDS) circuit is presented for eliminating KTC noise of integration capacitor (0.15 pF) in mode of integration while read. The circuit has been fabricated with 0.5 μm 5 V N-well CMOS process. Test results show that ROIC noise is 1.7×10^{-4} V and dynamic range is above 80 dB, working well after interfaced with InGaAs detectors.

Key words: infrared focal plane array (FPA); readout integrated circuit (ROIC); integration while read; correlated double sampling

PACS: 07.57.Kp

引言

工作波长为 0.9 ~ 1.7 μm 的 InGaAs 短波红外探测器在常温即具有较高的探测率, 在航天航空遥感、微光夜视、短波成像等领域有着重要应用^[1]. 由于它在短波红外探测方面的优势, 近些年来国外发射的一些地球资源卫星、环境卫星等均选择采用 InGaAs 红外焦平面作为短波波段的探测器^[2].

焦平面组件应用于航天遥感, 信噪比是衡量其性能的一项重要指标, 读出电路作为焦平面的重要组成部分, 设计低噪声的读出电路有助于提高焦平面的信噪比. 随着红外焦平面不断向超大规模高帧

速等方向发展, 小面积高速读出电路的低噪声设计一直是读出电路设计领域的热点和难点^[3-4].

设计了一款航天遥感用 InGaAs 短波红外焦平面读出电路芯片, 输入级采用电容负反馈放大电路结构 (Capacitance Trans-impedance Amplifier, CTIA), 通过在复位开关管旁串联补偿管来减小沟道电荷注入效应带来的误差电压. 为抑制边积分边读出模式下的 KTC 噪声, 提出一种新型相关双采样电路结构. 芯片测试结果符合设计目标, 在高帧频边积分边读出模式下工作状态良好, 电路噪声小于 1.7×10^{-4} V, 动态范围大于 80 dB.

收稿日期: 2010-08-20, 修回日期: 2011-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(50632060)

作者简介: 黄张成(1985-), 男, 湖北浠水人, 博士研究生, 主要研究领域为红外焦平面读出电路, E-mail: huangzc@mail.sitp.ac.cn.

Received date: 2010-08-20, revised date: 2011-04-15

1 读出电路中的 KTC 噪声

InGaAs 焦平面读出电路的基本功能是对 InGaAs 光敏芯片的电流信号进行积分、采样、传输和读出^[5], 电路的积分电容 C_{int} 决定了电流转换电压的灵敏度. 积分电容在开始积分时, 复位开关管断开, 开关 MOS 管沟道噪声电子会保持在积分电容上, 形成开关复位噪声 (KTC 噪声), 其理论值约为 $v_{n,KTC} = \sqrt{kT/C_{int}}$. 航天遥感信号一般比较微弱, 积分电容很小, KTC 噪声电压比较大.

一般输入级的运放噪声和积分电容的 KTC 噪声是读出电路的主要噪声源. 所设计电路输入级运放采用二级差分输入单端输出结构, 运放在输出端的噪声电压为:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{n,op,out} &= \left(\frac{C_{int} + C_{det}}{C_{int}} \right) \bar{v}_{n,op,in} \\ &= \left(\frac{C_{int} + C_{det}}{C_{int}} \right) \left(2 \int_{f_a}^{f_b} (S_{n,m1}(f) + \frac{g_{m3}^2}{g_{m1}^2} S_{n,m3}(f)) df \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} S_{n,m1}(f) &= 8kT/(3g_{m1}) + K_p/(C_{ox}W_1L_1f) \\ S_{n,m3}(f) &= 8kT/(3g_{m3}) + K_n/(C_{ox}W_3L_3f), \end{aligned}$$

($S_{n,m1}(f)$ 、 $S_{n,m3}(f)$ 分别是运放输入管和电流镜管的噪声功率谱密度, C_{det} 是探测器单元电容, g_{m1} 、 W_1 、 L_1 、 g_{m3} 、 W_3 、 L_3 分别是运放输入管和电流镜管的跨导、沟道宽度和长度, K_p 和 K_n 分别是 PMOS 和 NMOS 管 $1/f$ 噪声的工艺参数), 根据系统输入条件, 积分电容设计值为 0.15 pF, 代入光敏芯片及电路设计参数, 计算得到 $v_{n,KTC} = 1.6 \times 10^{-4}$ V, $v_{n,op,out} = 1.2 \times 10^{-4}$ V. 根据计算结果, KTC 噪声是读出电路的主要噪声, 要降低电路噪声, 需要先抑制积分电容的 KTC 噪声.

相关双采样 (Correlated Double Sampling, CDS) 可以有效抑制 KTC 噪声, 同一积分过程中的两次采样信号存在时间相关性, 其相关系数为^[6]

$$P_R(\tau) = e^{-\Delta\tau/R_{off}C} \quad (2)$$

两次采样信号差分之后, 其中 KTC 噪声为:

$$\bar{v}_{n,KTC,then} = \sqrt{(1 - e^{-\Delta\tau/R_{off}C_{int}})kT/C_{int} + 2kT/C_{sh}} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中, $\Delta\tau$ 为两次采样的时间间隔, R_{off} 是开关 MOS 管的截止电阻, 采样电容 C_{sh} 为 4 pF. 差分之前 KTC 噪声为 1.67×10^{-4} V, 差分之后信号 KTC 噪声 (包括采样电路噪声) 为 3.6×10^{-5} V, 噪声减小了 78%.

采样电路能否实现相关采样和电路工作模式密切相关. 先积分后读出模式下的 CDS 电路有多种实现结构^[7], 这些电路工作在边积分边读出模式下时, 两次采样失去了相关性, 差分之后噪声为

$$\bar{v}_{n,KTC,then} = \sqrt{(1 + e^{-\Delta\tau/R_{off}C_{int}})kT/C_{int} + 2kT/C_{sh}} \quad (4)$$

式(4)噪声为 2.39×10^{-4} V, 和差分之前 1.67×10^{-4} V 相比增大了 43%, 噪声反而增加.

2 边积分边读出相关双采样电路设计

为航天遥感用 InGaAs 组件设计读出电路芯片, 应用特点是时间分辨率高, 帧时短. 由于焦平面组件的信号电压和积分时间成正比, 噪声电压的平方和积分时间近似成线性增加, 积分时间越长, 信噪比越高, 和先积分后读出模式相比, 边积分边读出模式节省了读出时间, 尽可能地将帧时用于信号积分, 信噪比更高. 由于 InGaAs 红外焦平面工作帧时很短, 约 100 ~ 200 μ s, 而读出时间需 50 μ s, 为提高信噪比, 读出电路必须工作于边积分边读出模式. 两种工作模式下组件信噪比的比较结果见图 1.

为在边积分边读出下消除 KTC 噪声, 设计了一种新型 CDS 电路结构, 如图 2 所示.

边积分边读出模式下脉冲时序如图 3 所示.

在 $T_{n,SH1}$ 时刻 (SH1 上升沿), C_{sh4} 等量采样 C_{sh2}

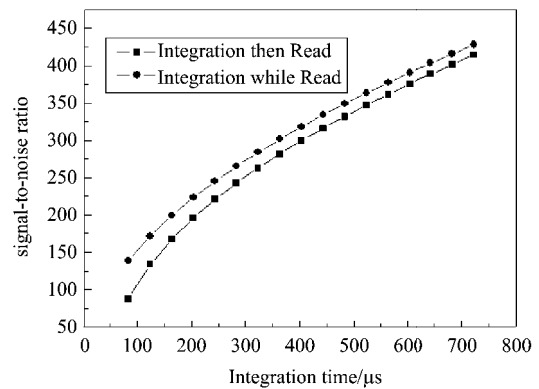


图 1 两种工作模式下的信噪比

Fig. 1 Comparison of S/N in different modes

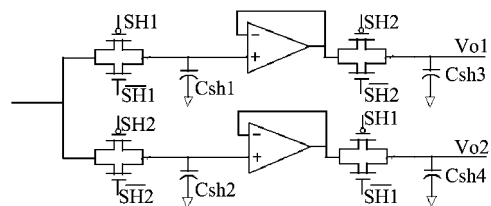


图 2 新型 CDS 电路结构

Fig. 2 Schematic of a new CDS circuit

电压;在 $T_{n,SH2}$ 时刻(SH2 上升沿) C_{sh3} 等量采样 C_{sh1} 电压. 设 T_{K-1}, T_K, T_{K+1} 周期 KTC 噪声分别为 v_{K-1}, v_K, v_{K+1} , 三者互不相关, 两次采样的电压时间相关系数为 $p_R (|p_R| < 1)$, 则在 $T_{K,SH1}, T_{K,SH2}, T_{K+1,SH1}, T_{K+1,SH2}$ 时刻, 采样电容 $C_{sh1}, C_{sh2}, C_{sh3}, C_{sh4}$ 上的 KTC 噪声电压见表 1.

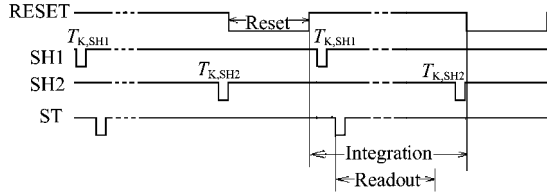


图3 边积分边读出脉冲工作时序
Fig.3 Time sequence of integration while readout

表 1 不同采样时刻采样电容上的 KTC 噪声
Table 1 KTC noise on sampling capacitors at $T_{K,SH1}, T_{K,SH2}, T_{K+1,SH1}$ and $T_{K+1,SH2}$

	C_{sh1}	C_{sh2}	C_{sh3}	C_{sh4}
$T_{K,SH1}$	v_K	$v_{K-1}p_R$	v_{K-1}	$v_{K-1}p_R$
$T_{K,SH2}$	v_K	$v_K p_R$	v_K	$v_{K-1}p_R$
$T_{K+1,SH1}$	v_{K+1}	$v_K p_R$	v_K	$v_K p_R$
$T_{K+1,SH2}$	v_{K+1}	$v_{K+1} p_R$	v_{K+1}	$v_K p_R$

以周期 T_{K+1} 为例, C_{sh3} 和 C_{sh4} 采样电压在 ST 脉冲上升沿之后 (SH1 之后 SH2 之前) 读出, 其 KTC 噪声分别为 v_K 和 $v_K p_R$, 两者存在强相关性, 差分之后 KTC 噪声被消除.

该采样电路中运放采用二级级联差分输入单端输出的结构. 为减小固定图形噪声, 运放的输入失调电压应尽可能的相等, 在设计版图时, 两个运放的版图需尽可能的对称. 运放等效输入噪声电压仿真值为 $125 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 KHz), 来自结构非对称的输入失调电压为 $18 \mu\text{V}$, 单增益带宽 5.2 MHz , 相位裕度约 60° .

图 2 所示电路在边积分边读出时差分信号中 KTC 噪声及 CDS 运放噪声为

$$\bar{v}_{n,KTC,while} = \sqrt{\frac{kT}{C_{int}}(1 - e^{-\Delta\tau/R_{off}C_{int}}) + 4\frac{kT}{C_{sh}} + 2\bar{v}_{n,op}^2}, \quad (5)$$

计算得到噪声为 $8.9 \times 10^{-5} \text{ V}$, 比式 (4) 减小了 63%, 表明该电路在边积分边读出时可有效抑制 KTC 噪声.

3 读出电路设计、仿真与测试结果

CTIA 具有偏置稳定、注入效率高, 线性度好等优点, 是一种线列焦平面读出电路常用的输入级结构, 采用 CTIA 作为输入级, 见图 4.

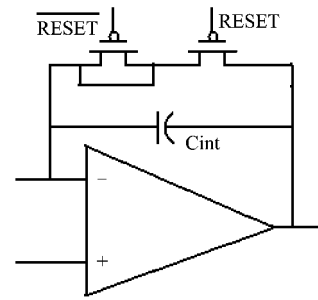


图4 CTIA 输入级
Fig.4 Schematic of CTIA

理想情况下运放输出端电压随积分时间线性下降, 但由于复位开关管的沟道电荷注入效应, 沟道残留电荷存储在积分电容上引入电压误差, 在复位开关管旁增加串联补偿管可以减小该电压误差^[8], 增加串联补偿管前后积分过程的对比见图 5, 误差电压值由 60 mV 减小到了 7 mV .

输入级运放为二级级联差分输入单端输出结构, 采用 PMOS 管作为输入对管, 选取较大的 W 和 L 以减小 $1/f$ 噪声. 等效输入噪声电压为 $19 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 KHz). 改变注入电流, CTIA 输出端信号随时间关系如图 6 所示, 积分线性度良好.

InGaAs 光敏芯片为 PIN 型, 光生电流正向流入积分电容, 输出端电压下降, 为增大输出摆幅, 提高动态范围, 输出级采用 PMOS 管串联上拉负载电阻的结构, 负载电阻为 $7 \text{ k}\Omega$ 时, 饱和输出电压可达 2.0 V , 线性输出摆幅 1.7 V . 读出电路单元整体电路图如图 7 所示.

读出电路整体版图见图 8. 读出电路采用 $0.5 \mu\text{m} 5 \text{ V}$ Nwell CMOS Mixed Signal 工艺流片. 计算和测试两种模式下电路的噪声, 动态范围作为电路应用时的最大信噪比, 计算对应的动态范围, 见表 2.

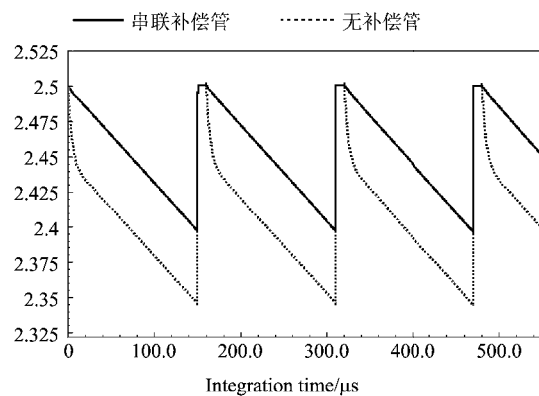


图5 增加补偿管前后信号积分对比
Fig.5 Comparison of integration with and without compensating MOS device

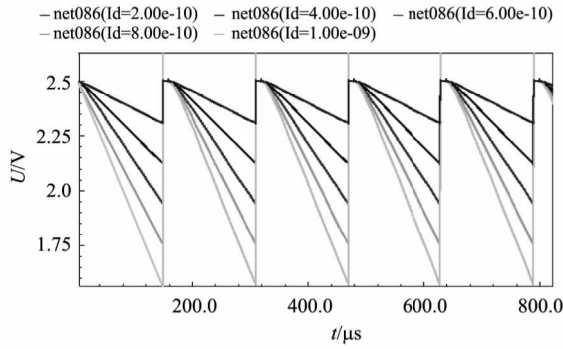


图6 CTIA 输出信号和时间关系
Fig. 6 CTIA output signal versus time

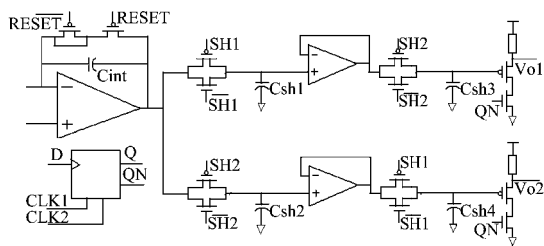


图7 读出电路单元电路结构
Fig. 7 Schematic of ROIC unit circuit

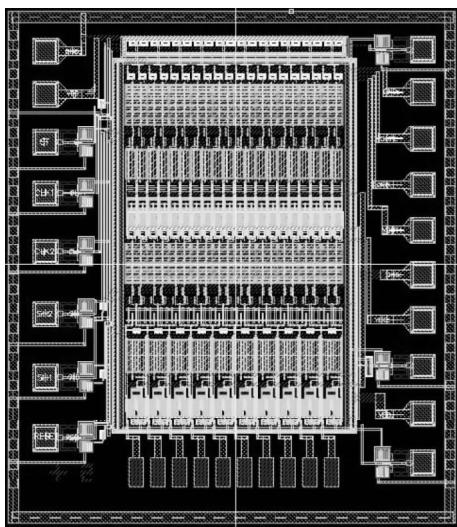


图8 读出电路版图
Fig. 8 Layout of ROIC

表2 两种读出模式下电路噪声的计算与测试结果
Table 2 Calculation results and test results of ROIC noise in different readout modes

	边积分边读出	先积分后读出
噪声计算结果/V	1.6×10^{-4}	2.8×10^{-4}
噪声测试结果/V	1.7×10^{-4}	8.2×10^{-4}
动态范围计算结果/dB	81	76
动态范围测试结果/dB	80	66

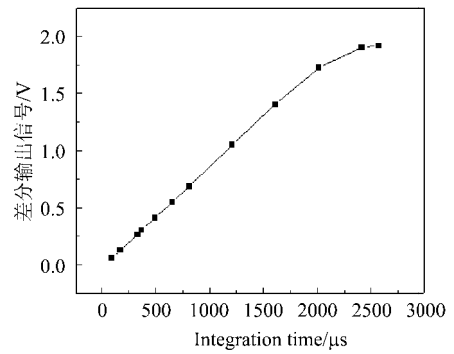


图9 焦平面信号和积分时间关系
Fig. 9 FPA output signal versus time

比较不同工作模式的电路噪声,测试结果和理论计算结果较接近,边积分边读出时 KTC 噪声被有效抑制。

电路芯片和 InGaAs 光敏芯片耦合焦平面后,测试不同积分时间和信号的关系,如图 9 所示,线性输出范围在 0 ~ 1.7 V,线性度 > 99%,高帧频下工作状态良好。

4 结论

设计了一款低噪声航天遥感用 InGaAs 短波红外焦平面读出电路,提出一种新型相关双采样电路结构,在边积分边读出模式下抑制积分电容的 KTC 噪声,测试电路芯片在该模式下的噪声小于 1.7×10^{-4} V,动态范围大于 80 dB. 电路芯片和 InGaAs 光敏芯片耦合焦平面后工作正常. 实验表明这种应用于边积分边读出模式下的相关双采样电路可以有效抑制 KTC 噪声,为低噪声读出电路设计提供了有益的思路。

REFERENCES

- [1] MacDougal M, Geske J, Wang C, et al. Low dark current InGaAs detector arrays for night vision and astronomy[J]. *Proc of SPIE*, 2009, **7298**: 72983F.
- [2] GONG Hai-Mei, LIU Da-Fu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering* (龚海梅,刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展. *红外与激光工程*), 2008, **37**(1): 18-24.
- [3] Joshi A, Stevens J, Kononenko A, et al. Ultra-low noise high frame rate ROIC for visible and infrared focal plane arrays[J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5499**: 228-239.
- [4] Johnson J F, Lomheim T S. Focal-plane signal and noise model CTIA ROIC[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, **56**(11): 2506-2515.
- [5] Hsieh C C, Wu C Y, Jih F W, 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.

(下转 304 页)