

高性能弹用碲镉汞红外焦平面读出电路

李 煜, 王 博, 白丕绩, 李立华, 刘会平, 洪建堂, 梁 艳, 李 敏, 胡彦博
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 研制出一种高性能弹用凝视型碲镉汞 (MCT) 中波红外焦平面 CMOS 读出电路 (ROIC) 芯片。读出电路采用快照 (Snapshot) 积分模式, 具有积分后读出 (ITR)、积分同时读出 (IWR)、长/短帧组合 (COMBINED) 积分和长/短帧插入 (INTERLACED) 积分 4 种模式可选功能, 有效解决高灵敏度和大动态范围的矛盾; 其他特征包括抗晕、多级增益可选、串口功能控制, 以及全芯片电注入测试功能。该读出电路采用 $0.35 \mu\text{m}$ DPTM 标准 CMOS 工艺, 工作电压 5.0 V 。测试结果体现了良好的性能: 在 77 K 条件下, 全帧频可到 250 Hz (插入积分模式), 功耗典型值为 20 mW 。

关键词: 弹用读出电路; 组合积分; 插入积分; 快照模式

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)09-0700-05

High Performance ROIC Applied in MCT Infrared Focal Plane Array for Missiles

LI Yu, WANG Bo, BAI Pi-ji, LI Li-hua, LIU Hui-ping, HONG Jian-tang,
LIANG Yan, LI Min, HU Yan-bo
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: A kind of staring MCT infrared focal plane CMOS Read Out Integrated Circuit (ROIC) for Missile was developed. The ROIC supported snapshot with four integration modes: integration then readout (ITR), integration while readout (IWR), Long/short frame Combined integration (COMBINED) and Interlaced integration (INTERLACED). Anti-blooming, multiple selectable gains, series port control modes and full chip current injection test functions are also included in it. The ROIC was fabricated in $0.35 \mu\text{m}$ 5.0 V DPTM standard CMOS process. The test results showed good performance of the ROIC. The frame of the ROIC is 250 Hz , and the total power dissipation is about 20 mW at 77 K .

Key words: read out integrated circuit in missile, combined integration, interlaced integration, snapshot

0 引言

近年来, 作战使命和作战环境的日益复杂化, 红外精确制导武器对红外成像导引头的要求也越来越高, 要求红外成像导引头具有高探测灵敏度、高空间分辨率、大动态范围, 并具有较强的目标识别能力、抗干扰能力和战场环境适应性。

国内外不仅对红外焦平面阵列的非均匀性校正给予了充分的重视, 渐渐开始关注红外焦平面阵列探测器的优化应用, 根据目标辐射特性和作战环境等情况使红外焦平面阵列工作在最佳模式^[1]。为了提高探测灵敏度, 一般希望采用较长的积分时间, 但在目标接近时, 如果积分时间过长, 会导致运动目标在红外焦平面阵列上所成图像模糊, 而且如果目标释放诱饵

干扰, 会导致红外焦平面阵列饱和, 以至检测不到目标。通过自适应地调整探测器积分时间和系统增益, 在导引头的探测灵敏度和动态范围之间获得最佳的折衷。但在积分时间变化量及频率、运动目标辐射强度估算、诱饵剔除等方面, 给信号处理、图像算法带来较大难度, 同时对帧间图像的时间和空间相干性提出较高要求^[2]。

本文提出一款基于 128×128 MCT 红外焦平面读出电路采用长、短积分组合模式, 通过后续处理电路进行两幅图像融合, 可以得到一幅同时包括高辐射强度的物体和低辐射强度的物体的最佳图像。组合积分模式可以有效解决高灵敏度和大动态范围的矛盾, 可以使有效动态范围扩展, 而没有灵敏度上的损失, 特别适用于高速成像制导。

1 读出电路原理设计

读出电路的设计基于深亚微米硅 CMOS 技术。读出电路使 FPA 能对来自光伏二极管的瞬时信号(直接注入)进行积分、存储、单元选通、行选通、信号采样-保持以及缓冲输出。

读出电路的设计具有很强的适应性,根据快摄(SNAP-SHOT)操作的要求,用户可以选择不同的工作方式,先积分后读出,组合积分和插入积分,积分时间可编程,可选增益等。

1.1 电路系统结构设计

图 1 给出了 128×128 读出电路的结构框图,此 ROIC 主要由以下几部分组成: 128×128 输入级单元电路阵列、偏置电压产生电路模块、列信号处理电路

模块、内部时钟产生电路模块、行/列译码器以及输出缓冲级等。

1.2 输入级单元电路设计

输入级单元电路由注入管 M_{GPOL} 、积分选择开关 M_{CP1} 和 M_{CP2} 、电荷存储管 M_{CAP1} 和 M_{CAP2} 、行选开关管 M_{SW1} 和 M_{SW2} 以及电注入测试管 M_{TEST} 和抗晕管 M_{VAB} 共 9 个 NMOS 管组成,如图 2 所示。

输入级的设计基于直接注入原理,针对长短帧积分模式,在对应积分时间内,光伏二极管的光电流信号通过直接注入信号 C_{KINT} 和选择信号 C_{AP1_SW} 和 C_{AP2_SW} 分别耦合到存储 MOS 电容 M_{CAP1} 和 M_{CAP2} 提供的势阱中。阵列所有输入级积分时间周期是同时开始的,在“积分信号脉冲”的上升沿开始积分,在下降沿积分结束。即以“快摄”积分模式工作^[3]。

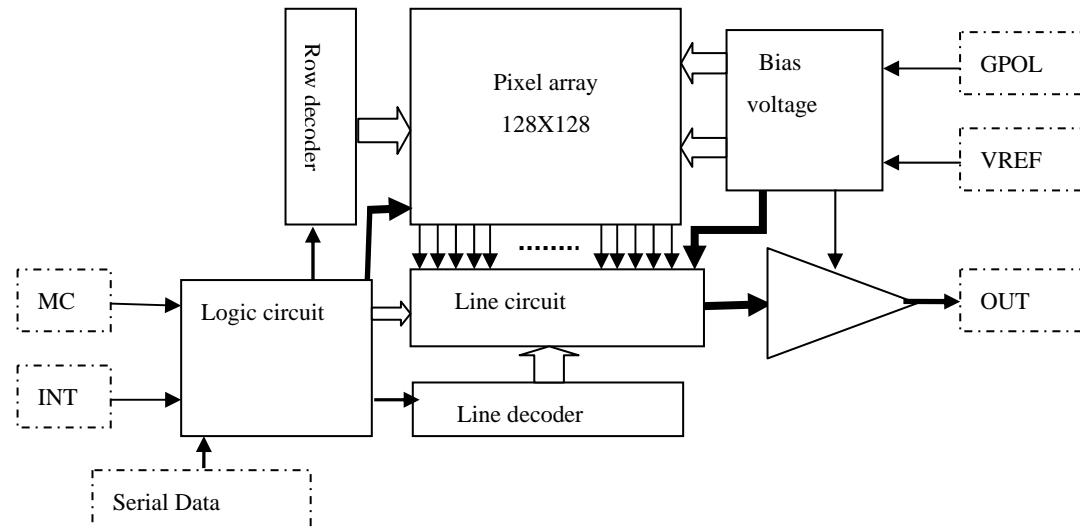


图 1 128×128 读出电路结构框图

Fig.1 Architecture of 128×128 ROIC

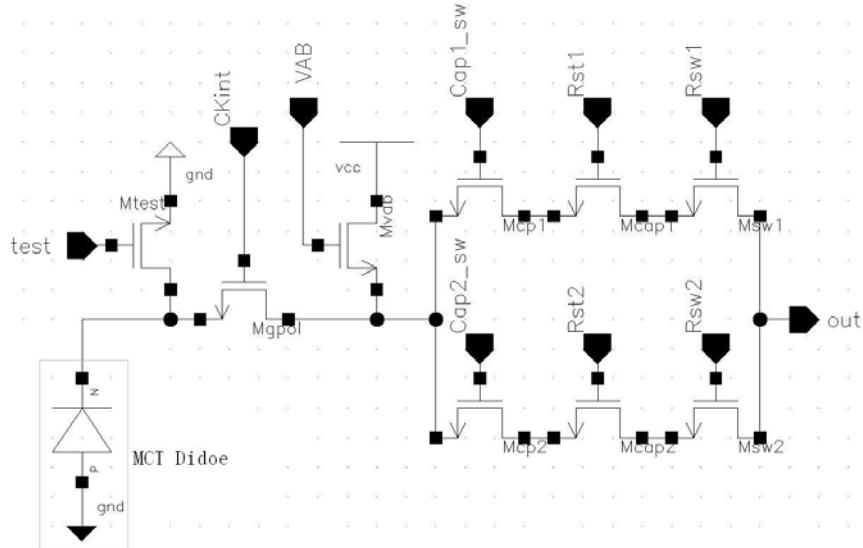


图 2 输入级单元电路原理图

Fig.2 Schematic of input cell circuit

当 Rst1 或 Rst2 为高电平时, MOS 电容 Mcap1 或 Mcap2 的栅氧层下衬底反型, 形成导电沟道; 通过选择信号 Cap1_sw 或 Cap2_sw, 来自探测器像元的光信号电流使积分势阱电容放电, 在一定的积分时间内, 不同的信号电流其放电的量不同; 在积分结束前, 读出管 Rsw1 或 Rsw2 打开, Rst1 或 Rst2 变为低电平, 信号电荷被转移到列级 CTIA 电路中。抗晕电路设计在单元电路中, 可为个别电流过大像元提供泻放通道以降低噪声和对内部电路的冲击。

1.3 C-V转换电路设计

在 128×128 读出电路中, 像素单元的输出为电荷信号, 因而需要在列放大级采用电荷放大器, 将电荷信号转成电压信号^[4]。列电荷放大器由高增益的运算放大器与反馈电容构成, 如图 3 所示。图中 C_{int} 为像素中的积分电容, C_{bus} 为列线寄生电容, C_a 为电荷放大器的反馈电容, V_{ref} 为电荷放大器的参考电平。

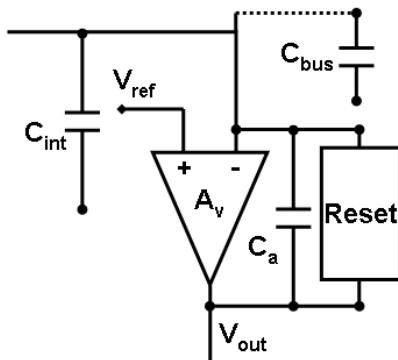


图 3 列信号处理电路原理图

Fig.3 Schematic of line circuit

设放大器的直流输出电压 $V_o = V_{ref}$, 像素单元复

位电压为 V_R , 积分后积分节点电压为 V_{int} , 复位后列线电压 $V_{bus} = V_{ref}$, 电荷转移后输出电压的变化 V_{out} , 则电荷放大器的输出电压可表示为:

$$V_{out} = V_{ref} + \frac{\frac{C_{int}}{C_a}(V_{ref} - V_R)}{1 + \frac{C_{int} + C_{bus}}{A_v \cdot C_a}} - \frac{\frac{Q_{int}}{C_a}}{1 + \frac{C_{int} + C_{bus}}{A_v \cdot C_a}} \quad (1)$$

1.4 读出电路工作原理

随着两个连续的 CKint 积分信号上升沿, 分别进行一帧长时间积分和一帧短时间积分^[5]。用一帧长时间对低温目标积分, 用一帧短时间对高温目标积分, 分别存储在各自的积分电容中, 然后分别转移到列级放大器和输出缓冲器。然后在后续图像处理电路中把两帧信号合成一帧, 于是一帧输出信号既有长时间积分的信号, 又有短时间积分的信号, 如图 4 所示。INTERLACED 模式下, 为使长短积分相关性更好, 将长帧积分信号分成相等的两段, 将短帧积分信号插入到两段中间, 合成一帧信号。

2 版图设计

128×128 读出电路版图设计基于 $0.35 \mu m$ DPTM 标准 CMOS 工艺, 该电路属于数模混合集成电路, 设计时需保证各个重复单元版图完全一致, 避免在底层单元引入非均匀性; 为满足应用需求, 该读出电路模拟 I/O 和数字 I/O 都是放在同侧, 设计时采用数模单独电源走线, 数模模块分布两边, 来减少数模信号的相互干扰。信号较弱的模拟信号和信号较强的数字信号都采用地线立体屏蔽。所设计的 128×128 读出电路版图如图 5 所示。

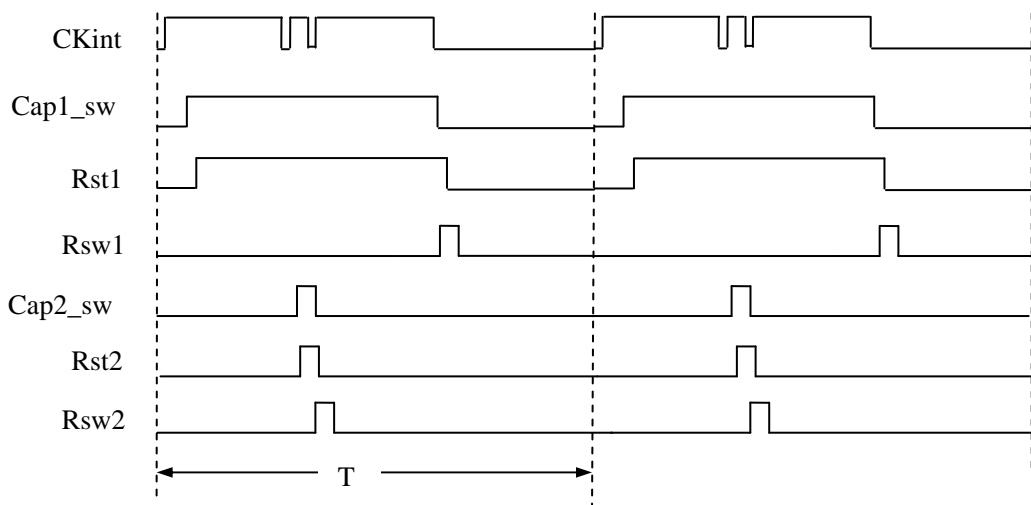


图 4 插入积分模式下输入级单元电路工作时序

Fig.4 Timing diagram of input cell circuit at INTERLACED

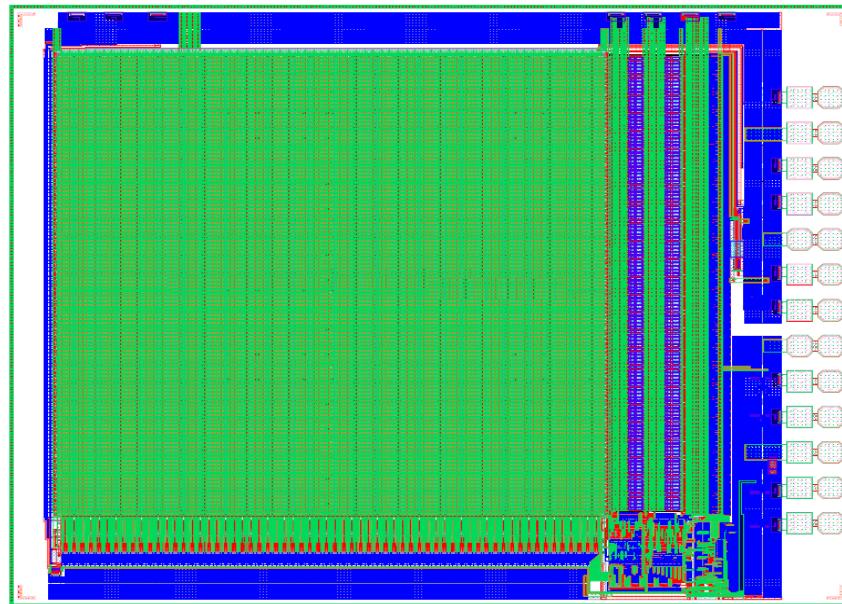


图 5 128×128 读出电路版图

Fig.5 Layout of 128×128 ROIC

3 128×128 读出电路测试验证

3.1 测试结果

利用 128×128 读出电路的内置测试管，在部门开发的读出电路测试系统上，对读出电路的功能及性能进行了测试，测试结果如表 1 所示。

表 1 128×128 读出电路芯片特征参数

Table 1 The specification of 128×128 ROIC chip

阵列规模	128×128
电源电压	5.0 V
中心间距	25 μm × 25 μm
积分后读出 (ITR) 模式、 长、短帧组合 (COMBINED)	
积分模式	功能正常
长、短帧插入 (INTERLACED)	
积分模式	
动态范围	80 dB
电荷处理能力	25 Me ⁻
最大读出速度	10 MHz
帧频	250 Hz (插入积分模式)
芯片尺寸	5.0 mm×4.3 mm
加工工艺	0.35 μm DPTM 标准 CMOS

短帧组合 (COMBINED) 积分模式和长、短帧插入 (INTERLACED) 积分模式测试波形。一帧时间内，长、短积分组合或插入模式工作，积分结束后串行输出短积分信号和长积分信号，以便后续图像信号处理。如图 6 和图 7 所示。

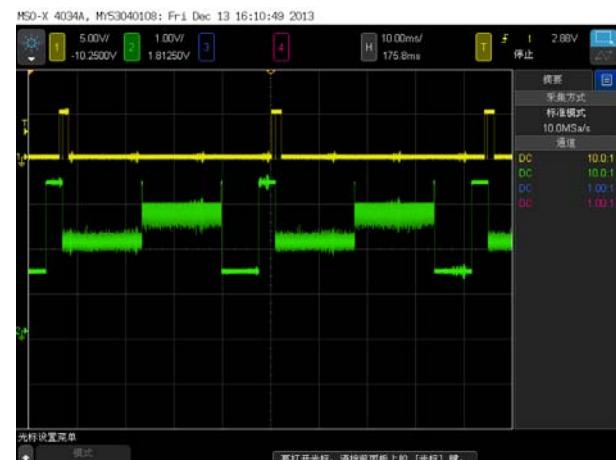


图 6 COMBINED 模式测试波形
Fig.6 The wave of signal at COMBINED

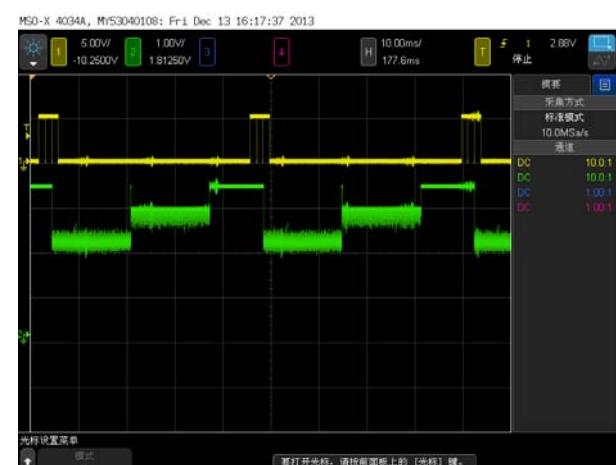


图 7 INTERLACED 模式测试波形
Fig.7 The wave of signal at INTERLACED

3.2 演示成像结果

挑选合格的读出电路芯片,与 128×128 中波MCT焦平面探测器芯片进行倒装互连,安装在全金属杜瓦内,并配接J-T制冷器,组成 128×128 中波MCT焦平面探测器组件。读出电路芯片照片如图8所示。

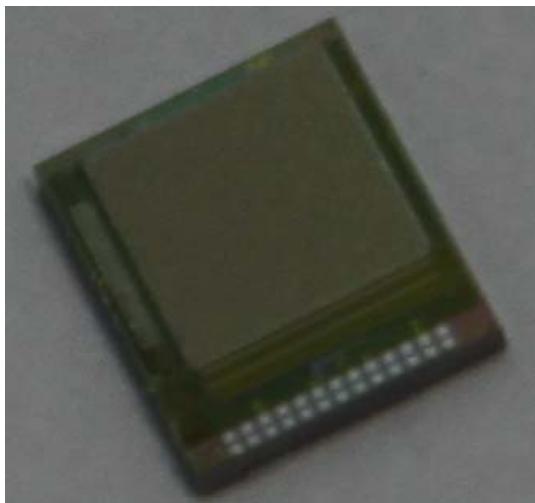
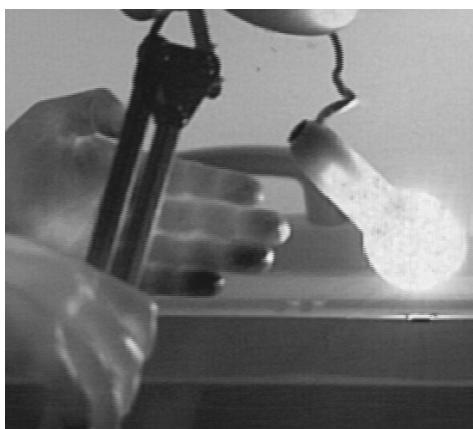


图8 128×128 读出电路芯片照片

Fig.8 128×128 Focal ROIC chip image

为验证长、短帧组合(COMBINED)积分模式、长、短帧插入(INTERLACED)积分模式功能,我们因地制宜,开发了弹用 128×128 MCT中波MCT焦平面探测器验证样机,其成像结果如图9所示。

如图9所示,使用长、短帧插入积分模式,一帧



(a) ITR 模式的像

图9 128×128 探测器组件成像图

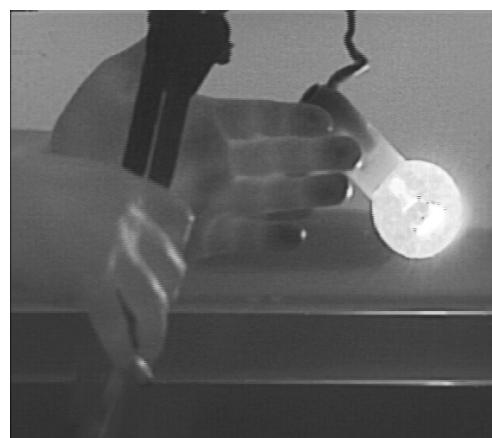
参考文献:

- [1] 范晋祥.高性能红外成像导引头设计中值得重视的几个问题[J].红外与激光工程,2006,35(z): 20-27.
- [2] 石艳霞,蔡辉,姜娜.弹载红外成像制导技术若干问题分析[J].红外与激光工程,2007,36(z): 225-227.
- [3] Nesher O, Elkind S, Adin A, et al. Performance of BF Focal Plane Array 320×256 InSb Detectors[C]//SPIE, Infrared Technology and Applications XXVIII, 2002, 4820: 699.

输出信号既有长时间积分的信号,又有短时间积分的信号(见图9,(a)为普通ITR模式,(b)为INTERLACED积分模式)。每帧输出两幅时间和空间相干性都非常好的图像,通过两幅图像融合,可以得到一幅同时包括高辐射强度的物体(灯泡里面的灯丝)和低辐射强度的物体(如人手等)的最佳图像。从成像结果来看,长、短帧插入积分组合模式可实现高温目标和低温背景同时较好成像,增大整个探测器组件的动态范围,有效解决高灵敏探测器成像中高温目标对低温目标压制现象。因此,使用该型读出电路的中波 128×128 探测器组件使用时能抗诱饵弹,降低虚警率,在复杂的战场环境条件下具有重要意义。

4 结论

设计的 128×128 读出电路具有结构简单,7级增益可调、串口控制可选,电学接口简单等特点。而且具有积分后读出(ITR)、积分同时读出(IWR)、组合(COMBINED)积分和插入(INTERLACED)积分等四种工作模式可选功能。设计分析及演示验证结果表明,采用长/短帧积分技术可以有效地解决高灵敏度和大动态范围的矛盾,可以使有效动态范围扩展,而没有灵敏度上的损失。读出电路已经应用于中波 128×128 MCT焦平面探测器,具备实用化能力,同时该技术可移植于 256×256 规格以及更大规模MCT焦平面探测器阵列。



(b) INTERLACED 模式的像

Fig.9 Imaging of 128×128 focal plane assembly

- [4] LIU Dan, LU Wen gao, CHEN Zhongjian, et al. Novel Low Power Column Stage Design of 320×288 Infrared ROIC[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(1).
- [5] B. Pain, S. Mendis, R. Schober, et al. Low-Power, Low-Noise Analog Circuits for on Focal-Plane Signal Processing of Infrared Sensors[C]//SPIE, Infrared Detectors and Instrumentation, 1993, 1946: 365.