

具有 TDMI 功能的 640×512 双色碲镉汞焦平面读出电路

白丕绩, 李 敏, 王 博, 陈 虢, 梁 艳, 洪建堂, 李立华

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 研制出一种应用于单铟柱结构的长/中波双色叠层碲镉汞 640×512 焦平面 CMOS 读出电路 (ROIC)。根据单铟柱结构的双色叠层碲镉汞探测器实际应用需求, 读出电路设计了单色长波积分/读出、单色中波积分/读出、长/中波双色信号顺序积分/读出、长/中波双色信号分时多路积分 (TDMI)/读出等四种工作模式可选功能。输入级单元电路分别采用长/中波信号注入管、复位管、积分电容及累积电容, 并分别采用读出开关缓冲输出。为提高读出电路的适应性, 各色信号通路分别设计了抗晕管以提高探测器的抗晕能力; 读出电路采用快照 (Snapshot) 积分模式, 单色积分时具有先积分后读出 (ITR)/边积分边读出 (IWR) 可选功能; 当读出电路工作在单色或双色信号顺序模式时, 各色积分时间可调; 此外读出电路具有多种规格及任意开窗模式。该读出电路采用 $0.35 \mu\text{m}$ 2P4M 标准 CMOS 工艺, 工作电压 3.3 V。读出电路具有全芯片电注入测试功能, 测试结果表明, 在 77 K 条件下, 读出电路的四种积分/读出模式工作正常, 单色信号输出摆幅达 2.3 V, 功耗典型值为 65 mW。

关键词: 长/中波双色焦平面; 单铟柱双色叠层结构; 双色读出电路; 时分多路积分

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2015)12-1016-06

The ROIC for 640×512 Dual Band MCT Focal Plane Arrays with TDMI Operation

BAI Pi-ji, LI Ming, WANG Bo, CHEN Xiao, LIANG Yan, HONG Jian-tang, LI Li-hua

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The 640×512 ROIC used for one-indium-bump dual band MCT stacked focal plane array was developed. Four kinds of operation, LWIR only integration, MWIR only operation, DWIR Sequential integration and DWIR time-division multiplexed integration, were designed for one-indium-bump dual band MCT stacked focal plane array. The pixel input cell circuit was designed with LW integration DI circuit and MW integration DI circuit, the LW signal and MW signal were transported separately. To improve adaptability of the dual band detector assembly, the anti-booming operation had been achieved. The ROIC supports dual band signal Snapshot module, integration then readout (ITR) or integration while readout (IWR) operation separately, and selectable window readout modes. The 640×512 dual band focal plane ROIC was fabricated in $0.35 \mu\text{m}$ DPFM CMOS process. The test result shows that the ROIC has good performance. The dynamic range of the ROIC is 2.3 V, the time-division multiplexed integration operated well, and the total power dissipation is about 65 mW.

Key words: long/middle wave dual band focal plane array, dual band read out integrated circuit, time-division multiplexed integration, one-indium-bump dual band MCT stacked

0 引言

双色红外焦平面能够同时获取同一目标的 2 个红外波段的辐射信息, 可以从复杂背景条件下, 将原来对目标的单一探测 (detection) 功能扩展到对目标的

认识 (identification), 最终实现对目标的可快速识别 (discrimination), 在侦查、预警、反导弹拦截等领域有非常重要的作用, 因此双色焦平面探测器一直是红外探测领域中研究的热点。

美国、法国、英国在双色碲镉汞焦平面探测器研

收稿日期: 2015-01-22; 修订日期: 2015-06-11.

作者简介: 白丕绩 (1976-), 男, 云南祥云人, 研究员, 博士研究生, 主要研究方向为红外探测及信号读出, E-mail: hibai@126.com。

基金项目: 国防预研基金。

究方面起步早、技术成熟、一直处于领先地位^[1-2]。从引出电极个数来区分，双色碲镉汞焦平面探测器的结构主要有单钢柱结构和双钢柱结构，相应的读出电路工作模式有顺序积分读出和同时积分读出 2 种形式。单钢柱结构的主要优点是芯片结构简单，每个光敏元只需一个独立的电极，主要缺点是 2 个波段的探测器信号不能同时读取，对焦平面的帧速有较大的影响；双钢柱结构则完全采用单色芯片的工艺技术，在一个区域分出 2 个光敏元，其优点是利用二代焦平面的成熟技术，而缺点是减少了光敏元的有效面积。

为充分利用光敏元的有效面积，又能达到同时积分的效果，美国 RVS (Raytheon Vision Systems) 研制了适用于单钢柱叠层结构的长/中波双色碲镉汞读出电路 (ROIC)，采用时分多路积分 (time division multiplexed integration, TDMI) 和子帧平均 (Sub-frame Average, SFA) 技术，先后研制成功 640×480、1280×720 等一系列规格的长/中波双色碲镉汞焦平面探测器，达到准同时 (quasi-simultaneously) 积分读出的效果^[3-4]。

TDMI 工作模式的焦平面读出电路，长波/中波 (LW/MW) 两个波段的信号分时多路积分，同时读出；探测器的工作状态分时多路控制，达到最佳状态。在这个读出电路设计时，TDMI 控制电路很重要。由于要在一帧积分时间内，实现两个波段的信号分时多路积分、分别累加；且两个波段的信号有数量级的差异，输入级单元电路设计十分关键，否则会导致长波信号积分饱和而中波信号积分不够的现象。

1 640×512 双色焦平面读出电路设计

1.1 640×512 双色焦平面读出电路系统结构

图 1 给出了 640×512 双色焦平面读出电路的结构框图，此 ROIC 主要由以下几部分组成：640×512×2 输入级单元电路阵列、偏置电路产生模块、列级信号处理电路模块、工作模式控制模块、窗口控制模块、内部时钟产生电路模块，以及行/列译码器等；该 ROIC 一共使用 8 个输出缓冲放大器，分别用于缓冲

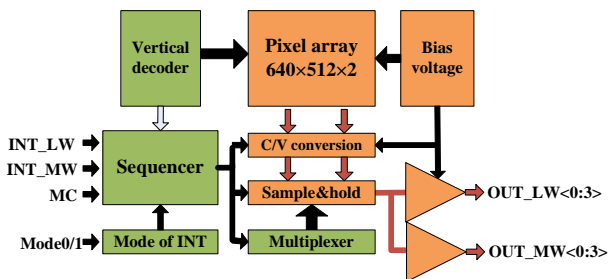


图 1 640×512 双色焦平面读出电路结构框图

Fig.1 Architecture of 640×512 ROIC for dual band FPA

输出长波和中波信号，以提高读出速率和帧频。

1.2 工作模式

读出电路设计针对 LW/MW 双色凝视型焦平面探测器单钢柱结构，以及准同时 (quasi-simultaneous) 积分、读出的快照操作要求^[5]，用户可以选择不同的工作模式：单色长波积分/读出、单色中波积分/读出、长/中波双色信号顺序积分/读出、长/中波双色信号时分多路积分 (TDMI) /读出等 4 种工作模式可选功能；积分时间可编程；其它的特征包括：抗光晕、积分时间可编程、同一读出电路上可适用 640×512、640×480、512×512 等 3 种规格的焦平面阵列，以及开窗模式工作，随机的窗口方式可用作小于一帧的成像。

根据控制字 Mode1/0 的不同取值，输入级有 4 种可选工作模式，其中“10”为默认 (Default) 模式，如表 1 所示。

表 1 4 种工作模式及电荷处理能力

Table 1 Four kinds of operation mode and charge capacity		
Mode1/Mode0	工作模式	电荷处理能力
00	单色长波积分读出	18.9Me ⁻
01	单色中波积分读出	5.25Me ⁻
10	长波/中波顺序积分读出	5.25Me
11	长波&中波 TDMI 读出	18.9Me/5.25Me

1.3 输入级单元电路设计

基于直接注入积分原理，在输入级电路里设计了 2 套单元电路，分别实现长波信号和中波信号的积分和读出^[5]。如图 2 所示，M1 和 M2 分别为中波信号和长波信号的注入管，C_{int_M} 和 C_{int_L} 分别为中波信号和长波信号的积分电容；M3 和 M4 分别为中波信号和长波信号的积分电荷转移开关，C_{PA_M} 和 C_{PA_L} 分别为中波信号和长波信号的累积电容；M9 和 M10 分别为中波信号和长波信号的行读出开关，用于控制中波和长波输入级信号读出；M5、M6、M7、M8 等 4 个场效应管分别用于对 C_{int_M}、C_{int_L}、C_{PA_M}、C_{PA_L} 等 4 个电容进行复位。

1.3.1 单色及双色信号顺序积分工作模式

当读出电路工作在单色长波积分/读出、单色中波积分/读出模式时，SUBPV 分别固定为低电平或高电平。为提高单色信号的积分电荷量，M3 和 M4 的控制电压 PA_L 和 PA_M 自动置为高，使得 C_{int_M} 和 C_{PA_M} 成为中波信号积分电容，C_{int_L} 和 C_{PA_L} 成为长波信号积分电容。在一帧周期内，长波/中波信号分别在各自的积分电容上积分，然后缓冲输出。

当读出电路工作在长/中波双色信号顺序积分/读出模式时，采用 ITR 积分模式。随着长波积分信号

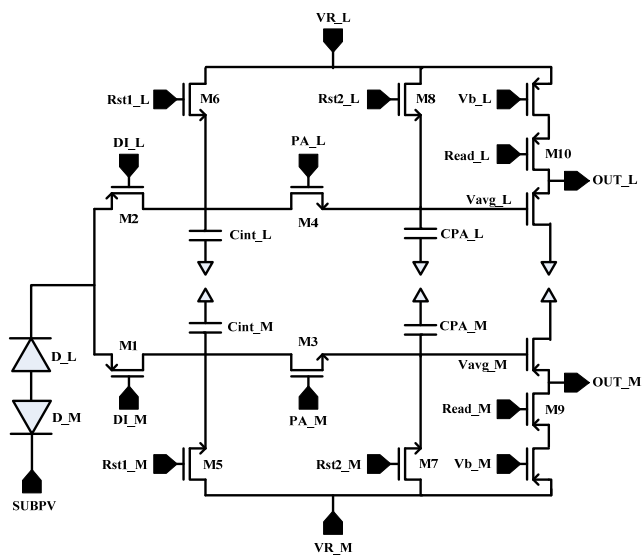


图2 输入级单元电路原理图

Fig.2 Schematic of input cell circuit

INT_LW 和中波积分信号 INT_MW 的上升沿, SUBPV 依次为低电平和高电平的周期性脉冲, 电平值根据长/中波探测器反向偏置要求, 由外部输入。

1.3.2 双色信号 TDMI 工作模式

如图 3 所示, 在 TDMI 工作模式下, 一个帧周期包含多个子帧周期, 长波信号和中波信号分别用各自的输入级单元电路在各个子帧周期内对像素的长波和中波光敏信号进行积分, 然后分别进行转移并各自完成累加; 当所有的子帧积分结束后, 所读出的积分信号就是分别进行了“像素累加 (PA)”处理后的长波和中波输出信号, 然后分别同时传输到列处理级。

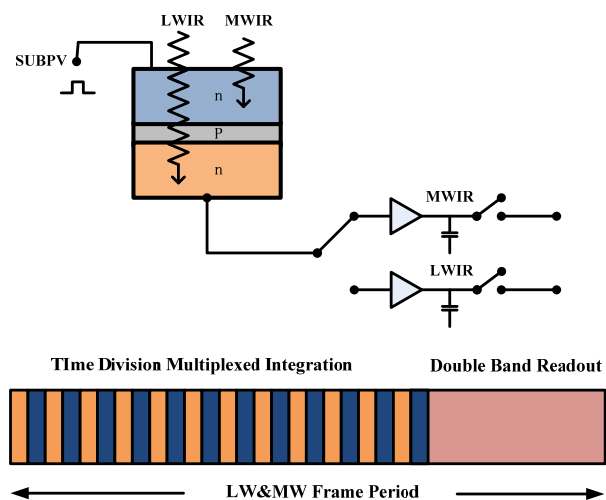


图3 时分多路积分 (TDMI) 工作原理图

Fig.3 Dual Band FPAs used a Time Division Multiplexed Integration (TDMI) scheme in which the detector bias polarity is alternated many times within a single frame period

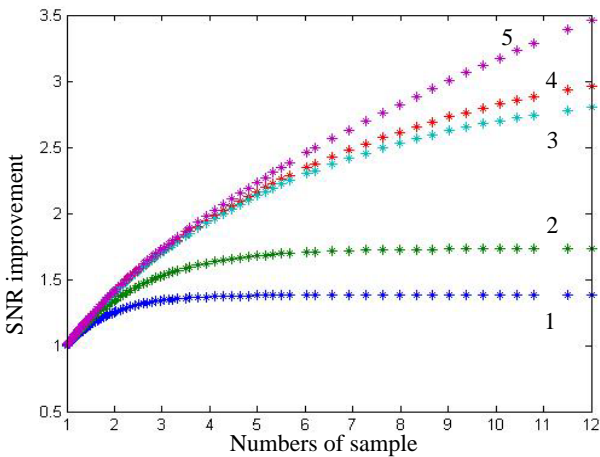
根据热像总体系统的指标分解, 综合考虑探测器的响应特性及读出电路现有设计水平, TDMI 工作模式下的一个帧周期包含 24 个子帧周期, 长波信号和中波信号分别用 12 个子帧周期交替进行信号积分及信号累加、读出。

电容 C_{PA} 的信噪比 (SNR) 遵循递归滤波器原理^[6-7], 当长波或中波信号进行 12 次像素累加, 信噪比提高效果与电容比例系数 α 有关, 电容比例系数 α 如式(1)所示, 信噪比增强效果如式(2)所示, 其中 Q_s 为积累的信号电荷、 Q_N 为积累的噪声电荷。

$$\alpha = C_{PA} / (C_{PA} + C_{int}) \tag{1}$$

$$SNR = \frac{Q_s(1 - \alpha^N)}{Q_N[(1 - \alpha^{2N})(1 - \alpha) / (1 + \alpha)]^{1/2}} \tag{2}$$

SNR 增强与 α 的关系如图 4 所示。可以看到, 当累加次数 N 一定时, 系数 α 越大时, SNR 增强效果也越显著。在输入级电路设计时要注意, 要在有限的像素面积内实现双色信号分别积分/读出, 既要保证电容比例系数 α 取值合理, 又要保证电容 C_{PA} 上的噪声在 ROIC 中是最大的。通过折衷考虑, 当累积次数为 12 次时, α 取值 0.8。采样次数与信噪比提高的关系如图 4 所示。



曲线 1: $\alpha=0.3125$; 曲线 2: $\alpha=0.5$; 曲线 3: $\alpha=0.8$; 曲线 4: $\alpha=0.833$; 曲线 5: $\alpha=0.99$

图4 采样次数与信噪比提高的关系

Fig.4 Numbers of pixel sample and accumulation

1.3.3 像素累计模式仿真结果

利用 Cadence spectre 程序对输入单元电路 (如图 2 所示) 进行了室温条件下的电路仿真, 以长波/中波探测器以 TDMI 工作模式进行了瞬态扫描, 仿真结果如图 5 所示。其中图 5(a)为对不同中波电流信号进行瞬态扫描的结果, 图 5(b)为对不同长波电流信号进行瞬态扫描的结果。可以看到, 在室温条件下, 通过 12 次信号累加, 中波信号的输出摆幅达 2.1 V 左右, 长

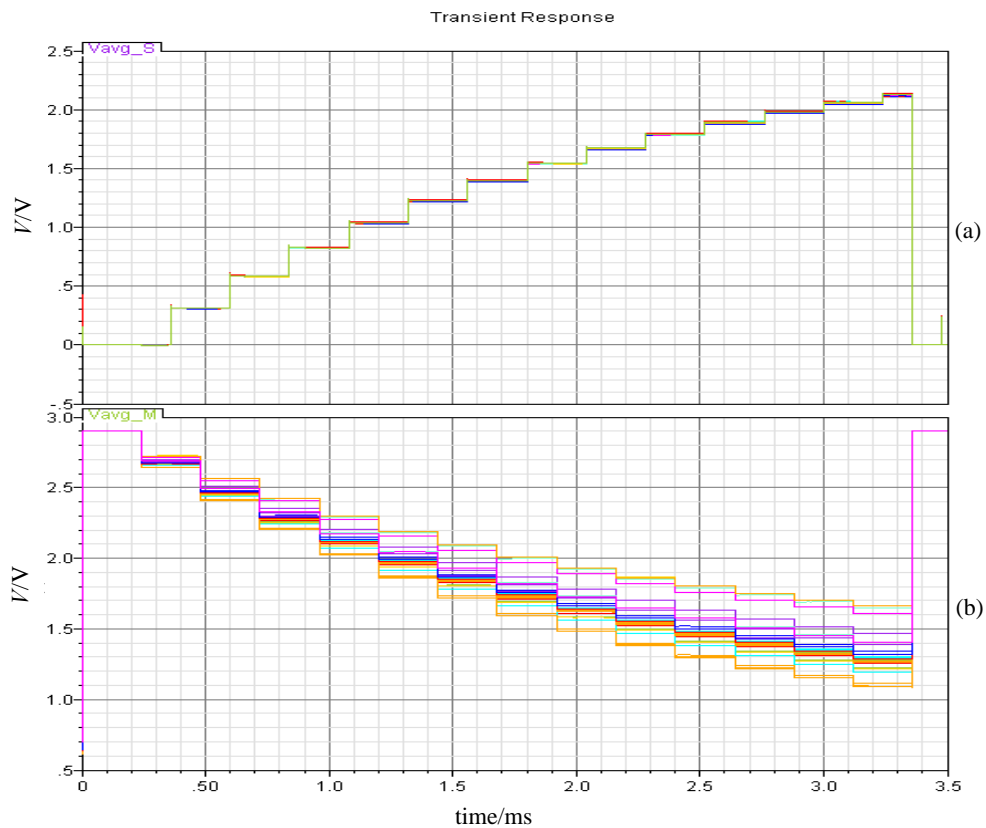


图5 TDMI 模式下不同输入电流作瞬态扫描(a) V_{avg_M} 节点波形, (b) V_{avg_L} 节点波形

Fig.5 Spectre results of input cell circuit at TDMI module operation (a) Timing diagram of V_{avg_M} , (b) Timing diagram of V_{avg_L}

波信号的输出摆幅也达到 2.1 V 左右。在低温条件下, 中波、长波信号的输出摆幅会有一定变化, 设计时充分考虑了冗余度。

1.3.4 双色信号 TDMI 工作原理

当选择双色信号 TDMI 工作模式, 须同步输入长波与中波的帧积分信号 (INT_LW 和 INT_MW)。积分过程在的 INT_LW 和 INT_MW 的上升沿开始。首先晶体管 M2 被闭合 (信号 DI_L 为高), 光电二极管 D_L 转换的电荷在积分电容 C_{int_L} 上积分; 长波信号积分结束后, 晶体管 M2 被打开 (信号 DI_L 为低), 晶体管 M6 被闭合 (信号 Rst1_L 为高); 然后晶体管 M1 被闭合 (信号 DI_M 为低), 光电二极管 D_M 转换的电荷在积分电容 C_{int_M} 上积分; 中波信号积分结束后, 晶体管 M1 被打开 (信号 DI_M 为高), 晶体管 M5 被闭合 (信号 Rst1_M 为高)。晶体管 M2、M1 闭合的持续时间称为子帧周期。研制的 ROIC 一个帧周期包含 24 个子帧周期, 长波、中波子帧周期分别为 12 个。如图 4 所示, 当每个子帧周期交替结束后, 晶体管 M1 或 M2 被交替打开 (信号 DI_L 为低、DI_M 为高), 积分电容 C_{int_L} 、 C_{int_M} 上的电荷被交替转移到累积电容 C_{PA_L} 、 C_{PA_M} 上。一旦完成上述转移, 复位开关晶体管 M6、M5 被交替闭合 (信号 Rst1_M、Rst1_L 为高), 使积分电容 C_{int_L} 、 C_{int_M} 交替被复

位, 然后分别开始第二个子帧周期的积分^[1,2,4]。

对于每一个子帧周期, 上述转移过程都会重复一次。值得注意的是, 在所有的子帧周期过程中, 累计电容 C_{PA_L} 、 C_{PA_M} 都不会被复位。于是, 在累计电容 C_{PA_L} 、 C_{PA_M} 上分别产生累积电荷 Q_{PA_L} 、 Q_{PA_M} 并且被保持。

当第 24 个子帧周期积分结束, 读出信号 Read_L、Read_M 同时到来, 该像素的长波与中波电荷累积信号分别被同时读出, 然后复位开关 M8 和 M7 同时被闭合 (信号 Rst2_L 和 Rst2_M 为高), 分别对电容 CPA_L、CPA_M 进行一次复位, 标志着一个积分周期 INT_LW、INT_MW 的结束。

1.4 双色信号 TDMI 控制电路模块设计

考虑到中、长波探测器转换时间需求, 设计了内部产生 TDMI 控制模块^[8-9]; 考虑到器件制作也属于探索阶段, 增加了外部输入 TDMI 控制模式, 使得长波和中波器件的积分时间、采样次数分别可调, 提高了电路的适应性。

1.4.1 双色信号 TDMI 控制电路 (默认模式)

从积分的上升沿开始后的 3076.5 MC 开始, 通过 SUBPV 端口依次输入 12 个从 0V 到 5V 的周期性脉冲信号, 周期 = $4MC/MC_TDMI$ (TDMI 时钟通过 MC_SEL 选择: MC_SEL=0 (default), TDMI=MC;

MC_SEL=1, TDMI=MC_TDM), 因此真正的积分时间是 $3076.5MC+51MC/MC_TDM$ 。积分时间可编程, 且可通过改变 MC/MC_TDM 来不断地改变。INT 的下降沿, 对应 MC 的上升沿, 它使输入 MOS 晶体管截止结束积分。电路图如图 6 所示, 控制信号脉冲波形如图 7 所示。

1.4.2 双色信号 TDMI 外部控制模式

从积分的上升沿开始后的 3076.5MC 开始 (TEST_ENA=0), 以 Rst_1 的下降沿触发, 通过 SUBPV 端口依次输入 n (建议值: $n=12$) 个从 0~3.3 V 的周期性脉冲信号; 并从外部端口依次输入

GPOL_LW_SW、GPOL_MW_SW、PA_LW、PA_MW、RST1_LW、RST1_MW 输入 TDMI 控制信号。上述 7 个脉冲信号可参考图 7 所示 TDMI 工作时序, 它们的周期、占空比等可根据探测器实际应用进行修改。

2 610×512 双色读出电路测试结果

640×512 双色读出电路采用 0.35 μm DPFM (2 Poly 4 Metal) 标准 CMOS 工艺制程, 加工出来的是 8 英寸 Wafer, 其中一个读出电路芯片如图 8 所示。

在输入单元电路里, 各波段处理电路都预置了测试管。当处于测试模式时, 测试管模拟光电流进行全

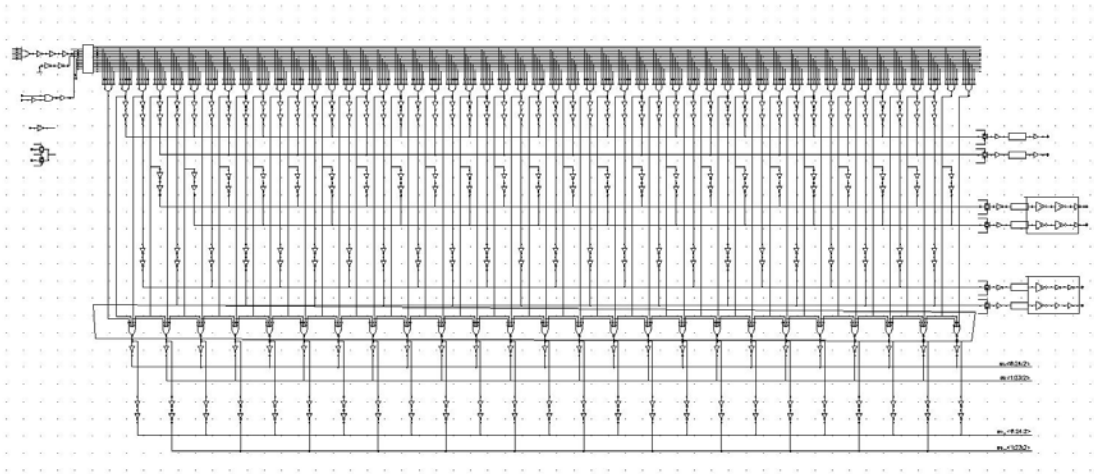


图 6 双色信号 TDMI 控制电路 (默认模式) Fig.6 Dual band signal TDMI control circuit(default)

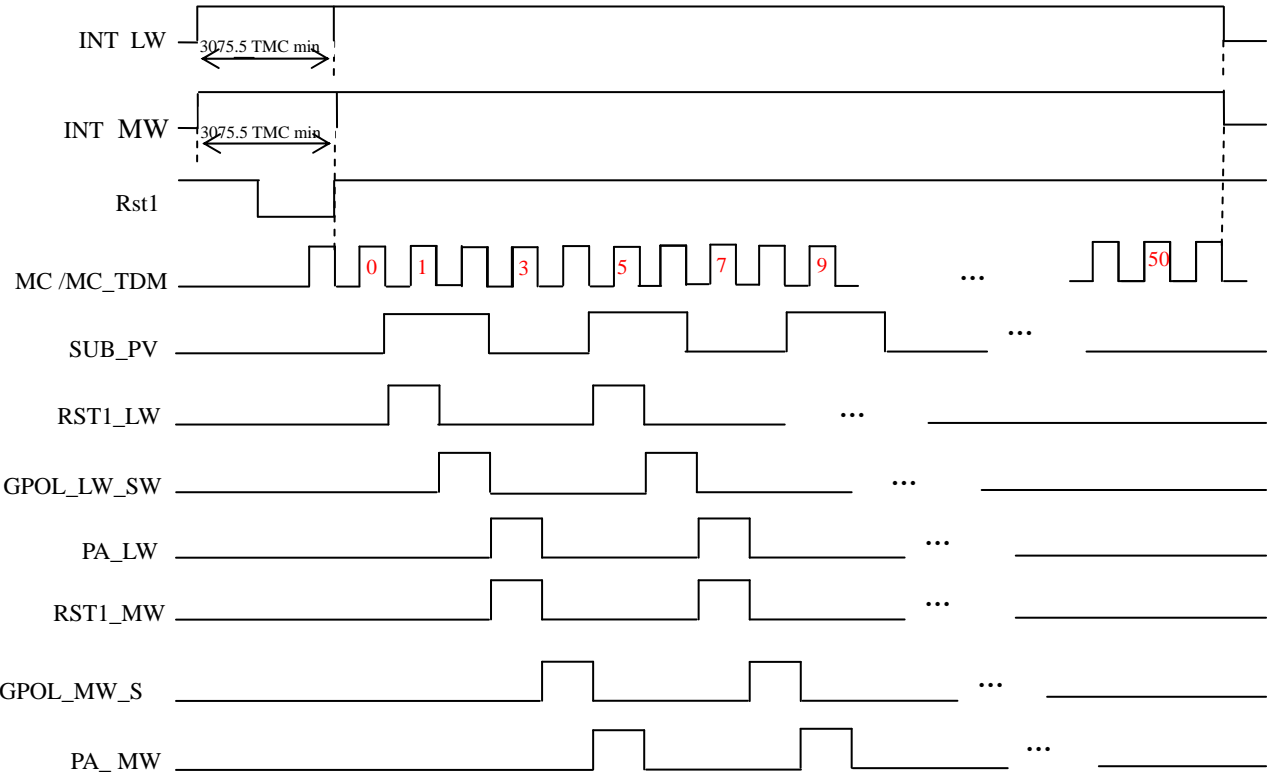


图 7 双色信号 TDMI 控制信号脉冲 (默认模式) Fig.7 Dual band signal TDMI control signal pulse (default)

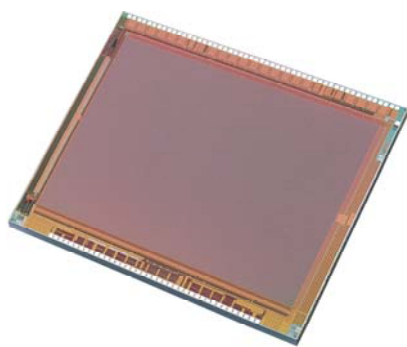


图8 640×512 双色焦平面读出电路芯片
Fig.8 640×512 dual band FPA ROIC chip

芯片电注入测试。改变测试管的栅电压，读出电路的输出相应改变。读出电路具备单色长波积分/读出、单色中波积分/读出、长/中波双色信号顺序积分/读出、长/中波双色信号时分多路积分（TDMI）/读出

等4种工作模式可选功能。采用采用单色信号工作模式时，读出电路的典型功耗是55 mW；采用双色信号TDMI工作模式时，读出电路的典型功耗是65 mW。读出电路具备的积分时间可调、多种规格及开窗模式等功能测试正常。表2列出了读出电路的主要特征参数。

3 结论

采用0.35 μm DPFM标准CMOS工艺，设计的640×512长/中波双色焦平面读出电路具有单色长波积分/读出、单色中波积分/读出、长/中波双色信号顺序积分/读出、长/中波双色信号时分多路积分（TDMI）/读出等4种工作模式可选功能，SNR较高等优点。理论分析及测试结果表明，采用TDMI技术可以达到准同时积分/读出效果。

表2 610×512 双色读出电路芯片77 K条件下特征参数

Table 2 The specification of 640×512 Dual Band ROIC chip under 77 K temperature		
阵列规模		640×512
输入级电路		DI、TDMI 模式
电源电压		3.3 V
中心间距		24 μm×24 μm
动态范围	单色长波积分（ITR）	75 dB
	单色中波积分（ITR）	75 dB
	长波/中波顺序积分读出	75 dB
	长波&中波 TDMI 积分读出	74 dB
最大读出速度		12 MHz
工作模式	单色长波积分（ITR/IWR）	正常
	单色中波积分（ITR/IWR）	正常
	长波/中波顺序积分读出	正常
	长波&中波 TDMI 积分读出	正常
动态窗口功能		正常
图像旋转功能		正常
功耗		55 mW（单色）65 mW（双色顺序/ TDMI 积分）
加工工艺		0.35 μm DPFM 标准 CMOS 工艺

参考文献：

[1] 白丕绩,姚立斌. 第三代红外焦平面探测器读出电路[J]. 红外技术, 2015, 37(2): 89-96.
BAI Pi-ji, YAO Li-bin. Read out integrated circuit for third-generation infrared focal plane detector[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(2): 89-96.

[2] Radford W A, E A Patten, D F King, et al. Third generation FPA development status at Raytheon Vision Systems[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXI* 2005, 5783: 331-339.

[3] Philippe TRIBOLET, Gérard DESTEFANIS. Third generation and multi-color IRFPA developments: a unique approach based on DEFIR[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXI*, 2005, 5783: 1-15.

[4] Price J P G, Jones C L, Hipwood L G, et al. Dual-band MW/LW IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXIV*, 2008, 69402: 69402S-1-11.

[5] King D F, Radford W A, Patten E A, et al. 3rd-Generation 1280×720 FPA development status at Raytheon Vision Systems[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXII*, 2006, 62060: 62060W-1-15.

[6] Michel Zécri, Patrick Maillart, Eric Sanson, et al. Advanced ROICs design for cooled IR detectors[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXIV*, 2008, 69402: 69402X-1-12.

[7] 李煜,白丕绩,王博,等. 具有像素累积(PA)功能的384×288焦平面读出电路[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2110-2113.
Li Yu, Bai Piji, Wang Bo. The 384×288 focal plane ROIC with pixel accumulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2110-2113.

[8] RAZAVI B. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿,程军,张瑞智,译. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
RAZAVI B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*[M]. Chen Guican, Chen Jun, Zhang Ruizhi, Translating. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.

[9] FOSSUM E R, PAIN B. Infrared readout electronics for space science sensors: state of the art and future directions[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Technology XIX*, 1993, 2020: 262-285.