

多功能红外焦平面读出电路设计

郑丽霞¹, 刘高龙¹, 吴 金¹, 孙伟锋^{2*}

(1. 东南大学微电子学院, 江苏南京 210096;

2. 东南大学电子科学与工程学院, 江苏南京 210096)

摘要: 主/被动成像系统具备多种成像模式, 集成度高、成本低、系统运行效率高, 应用前景良好。设计了一种 64×64 规模的多功能红外焦平面阵列读出电路, 在 30 μm 像元中心距的限制下实现了日光标准成像、微光成像、异步激光脉冲检测和二维激光测距四种成像功能。基于 TSMC 0.35 μm 工艺, 完成了多功能读出电路的芯片设计与流片验证。电路复用设计和像素共享架构显著降低了版图面积。CTIA 的 T 型开关有效减小漏电流, 改善了红外被动成像电路的动态范围, 高增益模式下动态范围达 60 dB, 低增益模式下动态范围达 68 dB。并且满阱电荷容量分别为 203 ke⁻和 1.63 Me⁻。三级 push-pull 运放和 MOS 反馈电阻使 RTIA 兼具高增益和小尺寸。芯片测试结果表明, 电路具备主/被动成像功能, 性能良好, 可应用于红外焦平面激光雷达成像系统。

关键词: 读出电路; 红外热成像; 激光主动成像; 主被动成像

中图分类号: TN492 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220139

Design of multifunctional infrared FPA ROIC

Zheng Lixia¹, Liu Gaolong¹, Wu Jin¹, Sun Weifeng^{2*}

(1. Institute of Microelectronics, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Electronic Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The active/passive imaging system has two imaging modes, with high integration, low cost, high system operation efficiency and good application prospect. A 64×64 multifunctional infrared focal plane array (FPA) readout integrated circuit (ROIC) was presented. Under the limitation of 30 μm pixel center distance, four imaging functions had been realized on this ROIC: Daylight standard imaging, low light level imaging, asynchronous laser pulse detection and two-dimensional laser ranging. Based on the TSMC 0.35 μm process, the chip design, tape out and test verification of multifunctional ROIC were completed. The layout area was significantly reduced by using circuit reuse design and pixel sharing architecture. The T-switch of CTIA was adopted to effectively reduce the leakage current and to improve the dynamic range of infrared passive imaging circuit, which made the dynamic range up to 60 dB in high gain mode and 68 dB in low gain mode. And the well capacity reached 203 ke⁻ in high gain mode and 1.63 Me⁻ in low gain mode. Three-stage push-pull amplifier and MOS feedback resistor made RTIA have both high gain and small layout area. The test results show that the circuit has active/passive imaging functions and good performances. It can be applied to infrared FPA lidar imaging system.

Key words: ROIC; infrared thermal imaging; laser active imaging; active and passive imaging

收稿日期:2022-03-04; 修订日期:2022-03-14

基金项目:国家自然科学基金(62174028); 江苏省自然科学基金(BK20211046)

作者简介:郑丽霞,女,副教授,博士,主要从事数模混合集成电路方面的研究。

通讯作者:孙伟锋,男,教授,博士,主要从事智能功率器件及可靠性、智能功率集成电路与系统、数模混合集成电路方面的研究。

0 引言

红外成像探测技术经历了 50 多年的发展历程, 具有目标识别能力强、探测距离远、探测速率高等优势, 在航空航天、气象遥感、军事装备等领域获得了广泛应用。在机载激光探测和武器制导应用中, 一般需要广角红外成像与激光测距成像配合实现目标识别^[1-2]。国内外已有诸多学者实现了基于共口径或多组光学系统的红外复合探测系统^[3-8]。此类系统中往往需要多条光路和多个焦平面阵列进行成像, 通过后期数据处理进行数据融合, 增加了系统成本和复杂度, 而且为多传感器的视场对齐和图像融合带来了难度^[2]。而主/被动双模式测距成像系统只需一组焦平面阵列和光学通路就能实现主动激光成像和被动热成像, 系统运行效率高、成本低、尺寸和重量小, 拥有良好的应用前景, 已成为红外激光雷达的关键技术和发展趋势之一^[1,9]。

目前, 对主/被动红外成像读出电路 (Readout Integrated Circuit, ROIC) 的研究多见于国外报道。2011 年, Eric de Borniol 等研制的 320×256 雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) ROIC 同时具备主/被动成像能力, 像元中心距 30 μm^[10]; 同年, 以色列 Elbit Systems 公司研制的 640×512 面阵 ROIC 拥有日光/微光红外被动成像、激光主动成像等功能, 像元中心距 15 μm^[11]; 2016 年, 该团队进一步将阵列规模扩展至 1280×1024, 像元中心距减小至 10 μm^[12]。国内红外焦平面读出电路的报道大多数是基于盖革模式 (Geiger mode, GM) APD 的主动成像 ROIC, 对主/被动成像多功能 ROIC 的研究尚在起步阶段。典型报道有 2021 年中国科学院上海技术物理研究所提出的线性 HgCdTe APD 读出电路, 电路在单像素内实现了固定增益的被动成像和基于光子飞行时间 (Time of Flight, TOF) 的主动成像^[13]。这种主/被动成像 ROIC 的设计难点在于, 需要在很小的像元面积内 (一般小于等于 30 μm) 实现多种成像功能, 在同一像素阵列内简单累加多种电路并不可行。

文中基于主/被动成像原理, 根据系统实际功能、性能需要, 对主/被动红外成像读出电路的系统架构和关键电路进行了设计和验证。架构方面, 采用了电路结构复用和主动成像电路像素共享的设计方案; 电

路方面, 被动成像电路的电容反馈式跨阻放大器 (Capacitor Feedback Transimpedance Amplifier, CTIA) 利用 T 型开关减少漏电流、改善动态范围, 主动成像电路的电阻反馈式跨阻放大器 (Resistance Feedback Transimpedance Amplifier, RTIA) 采用三级 push-pull 运放和 MOS 电阻, 面积紧凑、稳定性高。

1 主/被动成像原理和输入级电路分析

1.1 红外被动成像原理

由于主、被动成像时的光生电流大小显著不同, 且两种成像模式对感应电压的要求存在较大差异, 所以需要分别通过 TOF 检测电路和光子强度检测电路进行主、被动成像。

被动成像一般采用光强检测。光强检测是对感应电压的幅值进行线性检测, 允许电路有较大延迟, 但要求噪声尽可能小。由于红外被动成像的光生电流较小, 所以适合采用电容感应的积分检测方式, 只要积分时间足够长, 电容两端就能积累足够大、适合后续电路采样的电压。而且光生电流消失后, 感应电压仍能保持一定时间, 降低了对后续电路响应速度的要求。不过电容的较长积分时间也影响了系统帧频。

1.2 激光主动成像原理

激光主动成像一般采用光子飞行时间检测。光子飞行时间检测是对感应电压的阈值状态进行检测, 阈值范围内允许存在一定噪声, 但要求检测延迟尽可能小。因为主动成像模式下光生电流较大, 所以该模式适合采用电阻感应方式, 感应电压与光生电流呈线性关系, 并且具有很高的响应速度, 一旦感应电压超过设定的阈值, 即可利用状态比较器生成脉冲信号。电阻感应方式下阵列可以实现很高的帧频。

两种检测电路适用于不同的成像模式, 多功能 ROIC 的输入级电路需要同时具备两种检测电路。受限于单像素尺寸, 两种电路不能在像素内简单并置, 多模式成像系统需要的是一种既可以获取光照强度信息、又可以获取目标距离信息的输入级电路。

1.3 输入级电路分析

为满足主/被动测距成像系统的实际应用需求, 文中提出的多功能红外焦平面读出电路应具有以下四种成像模式。

(1) 日光标准成像模式 (Daylight Standard Imaging Mode, DSIM): 在白天光源辐射强度较大的环境下进行红外成像;

(2) 微光成像 (Low-light-level Imaging, LLL Imaging) 模式: 在微光环境下进行红外成像;

(3) 异步激光脉冲检测 (Asynchronous Laser Pulse Detection, ALPD) 模式: 激光发射器随机时刻发射激光脉冲, 探测器即时检测反射激光。该模式可用于激光光斑的搜索和跟踪;

(4) 二维激光测距 (Two-dimensional Laser Range Finder, TLRF) 模式: 成像系统主动发射激光脉冲, 探测器检测反射激光并对目标测距成像。

其中日光标准成像和微光成像属于红外被动成像, 可分别工作于白天光源充足和夜晚光源微弱的环境; ALPD 和 TLRF 属于激光主动成像, ALPD 模式下系统可即时获取激光光斑的视场位置, TLRF 模式下则能获得目标的距离信息, 并实现 3D 成像。

上述成像模式中, ALPD、TLRF 电路的结构较复杂, 功耗高、面积大。为降低电路复杂度并减小版图面积, 文中采用激光主动成像电路像素共享的架构, 如图 1 所示。每 2×2 个像素共享一个主动成像电路单元, 任一像素检测到激光时, 都能触发共享电路的主动成像功能。此外, ALPD 电路与 TLRF 电路的结构复用设计进一步缩小了电路面积。

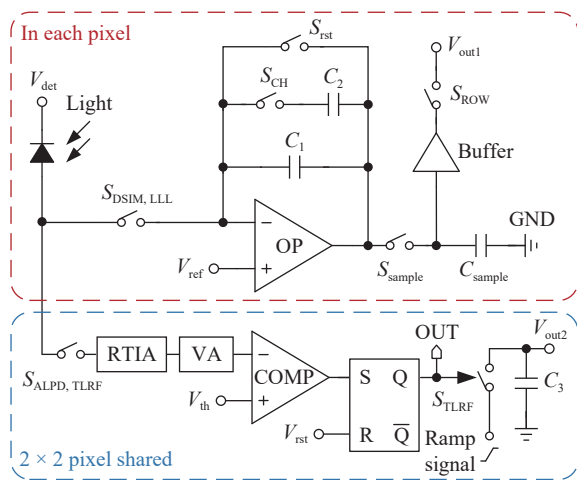


图 1 多功能输入级电路

Fig.1 Multifunctional input circuit

针对红外被动成像应用, 为改善其宽动态范围下的探测精度和检测微弱电流时的抗噪声能力, 积分检

测结构选取了电容反馈式跨阻放大器。放大器的电容档位切换功能改善了探测器的环境光强适应能力, 实现了高、低增益成像。日光成像和微光成像模式同样复用了 CTIA 电路, 降低了电路复杂度和面积。

2 多功能 ROIC 架构和关键电路设计

2.1 多功能 ROIC 系统架构

图 2 所示为读出电路的系统框图, 整个系统主要由像素单元阵列、偏置产生电路、输出缓冲单元和时序控制电路构成。其中时序控制电路包括行选信号产生电路、列选信号产生电路和异步并发检测电路。各电路的主要功能为:

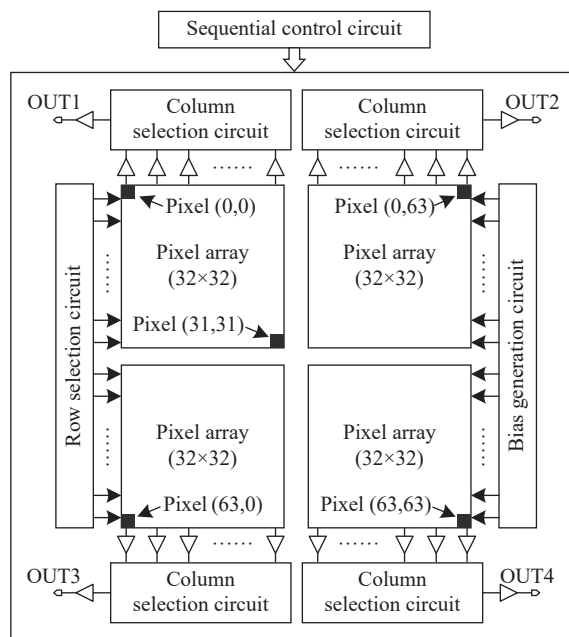


图 2 读出电路的系统框图

Fig.2 System block diagram of ROIC

(1) 像素单元阵列: 与探测器直接连接, 实现多种成像功能。阵列规模为 64×64, 共 4096 个像素, 每个像素具有一组日光成像、微光成像模式电路, 每 2×2 个像素共享一组 ALPD、TLRF 电路;

(2) 偏置产生电路: 为读出电路像素单元内部的运算放大器提供偏置电压;

(3) 输出缓冲单元: 缓冲像素单元阵列的输出数据并送入后续处理电路;

(4) 行选信号产生电路: 为行选开关提供行选信号, 行选开关位于每一个像素中, 可控制每个像素单

元的数据输出;

(5) 列选信号产生电路: 为列选开关提供列选信号, 一列像素单元共用一个列选开关。配合行选信号产生电路, 可以串行输出像素阵列内的信号;

(6) 异步并发检测电路: 多个 ALPD 电路同时输出触发信号时, 异步并发检测电路输出一个警示信号。

2.2 红外被动成像电路

文中采用 CTIA 型输入级电路实现红外被动成像功能, CTIA 具有高注入效率、高线性度、低噪声等优点。红外被动成像读出电路中常规的 CTIA 型输入级电路如图 3 所示, 其中 C_1 和 C_2 是积分电容, M_1 是复位管, M_2 是使能开关管。电路有两种工作模式: M_2 管开启时, 电容 C_1 和 C_2 并联, 电路处于低增益工作模式, 读出电路处于日光标准成像模式; M_2 管截止时, 电容 C_1 为积分电容, 电路处于高增益工作模式, 读出电路处于微光成像模式。

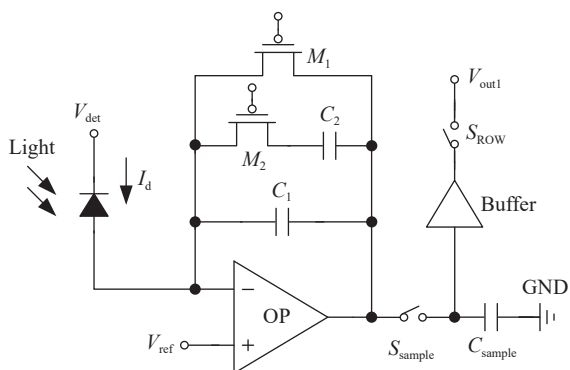


图 3 常规的 CTIA 型输入级电路

Fig.3 Conventional CTIA type input circuit

短波应用中, CTIA 的复位管存在漏电效应, 即使 M_1 管截止, 仍有部分积分电流会流经 M_1 , 影响积分电路的线性度, 微光环境下该问题尤为显著。亚阈值漏电流和漏致势垒降低 (Drain-Induced Barrier Lowering, DIBL) 效应^[14] 是导致这一问题的主要原因。亚阈值漏电流由 MOS 管源漏两端的压差引起, 漏致势垒降低效应则是晶体管工艺尺寸缩小的副产物。

为尽可能消除漏电流, 文中引入 T 型开关作为漏电隔离结构, 如图 4 所示。当 CTIA 复位时, M_1 和 M_4 导通, M_3 截止; 当 CTIA 进入积分阶段时, M_1 、 M_4 截止, M_3 导通。这样不仅可以减小漏电流, 还可以使 M_1 管源漏两端的压差在积分阶段保持恒定, 漏电流

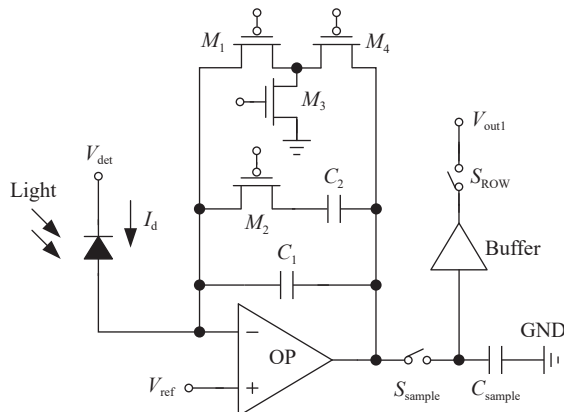


图 4 文中提出的 CTIA 型输入级电路

Fig.4 CTIA type input circuit proposed in this paper

不会因输出电压变化而增大。

2.3 激光主动成像电路

图 5 为激光主动成像电路, 主要包括 ALPD 电路和 TOF 测量电路。

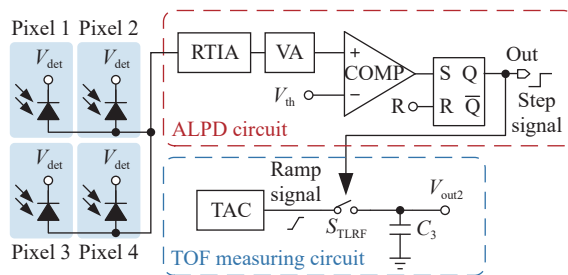


图 5 激光主动成像电路

Fig.5 Laser active imaging circuit

输入级电路需具备高增益和快速响应性能, 所以可采用低延迟的电阻反馈式跨阻放大器 RTIA 组成图 6 的前端放大电路。为使版图面积更紧凑和提高匹配性, RTIA 采用三级 push-pull 级联结构作为运放, 且该结构对静态工作点的漂移不敏感, 稳定性高。因

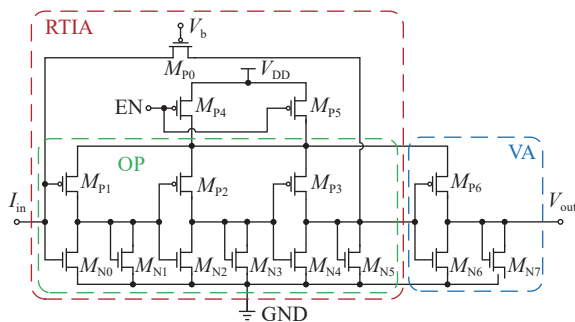


图 6 前端放大器电路

Fig.6 Front-end amplifier circuit

为用于主动成像的 RTIA 要有足够高的增益,即足够大的反馈电阻,以及可接受的噪声和带宽,所以反馈电阻可采用精度低但阻值达 $10^{11} \Omega$ 数量级的亚阈值区 MOS 管 M_{p0} 。PMOS 管电阻阻值高、面积小的优点使 RTIA 兼具高增益和小版图面积。而且和 NMOS 管相比,PMOS 管闪烁噪声更少的优点使其更适宜用作反馈电阻。后级电压放大器 (Voltage Amplifier, VA) 与 RTIA 直接耦合,并采用相同的放大结构,使电压放大器静态工作点的设置更方便。门控技术的运用也有效降低了前端放大器的平均功耗。

TLRF 电路可实现 3D 成像,部分结构可与 ALPD 电路复用。尽管时间幅度转换器 (Time-to-amplitude Converter, TAC) 动态范围有限,但是其精度高、面积小、功耗低的优点使它比时间数字转换器 (Time-to-digital Converter, TDC) 更适合在本应用中量化 TOF。

3 测试验证

制造、划片和封装后的读出电路芯片如图 7 所示。

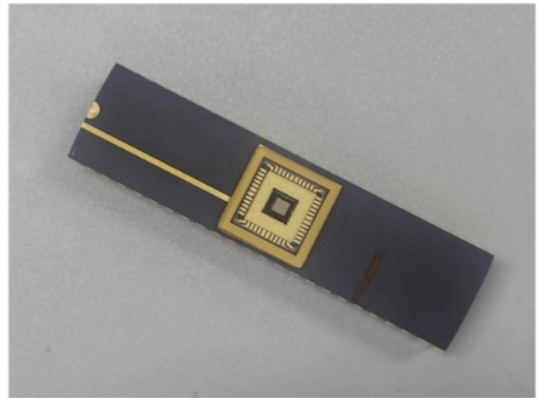


图 7 管壳封装的读出电路芯片

Fig.7 ROIC chip in shell package

随后搭建测试平台并对多功能 ROIC 进行测试验证。

图 8 (a) 为 CTIA 电路在低增益模式下的积分波形图。电路在复位信号 RST 下降沿时复位、上升沿时开始积分。结果表明 CTIA 电路的积分功能正常,积分信号 V_{out1} 具有良好的线性度,输入电流超量程后输出电压摆幅达到最大,为 2.18 V。

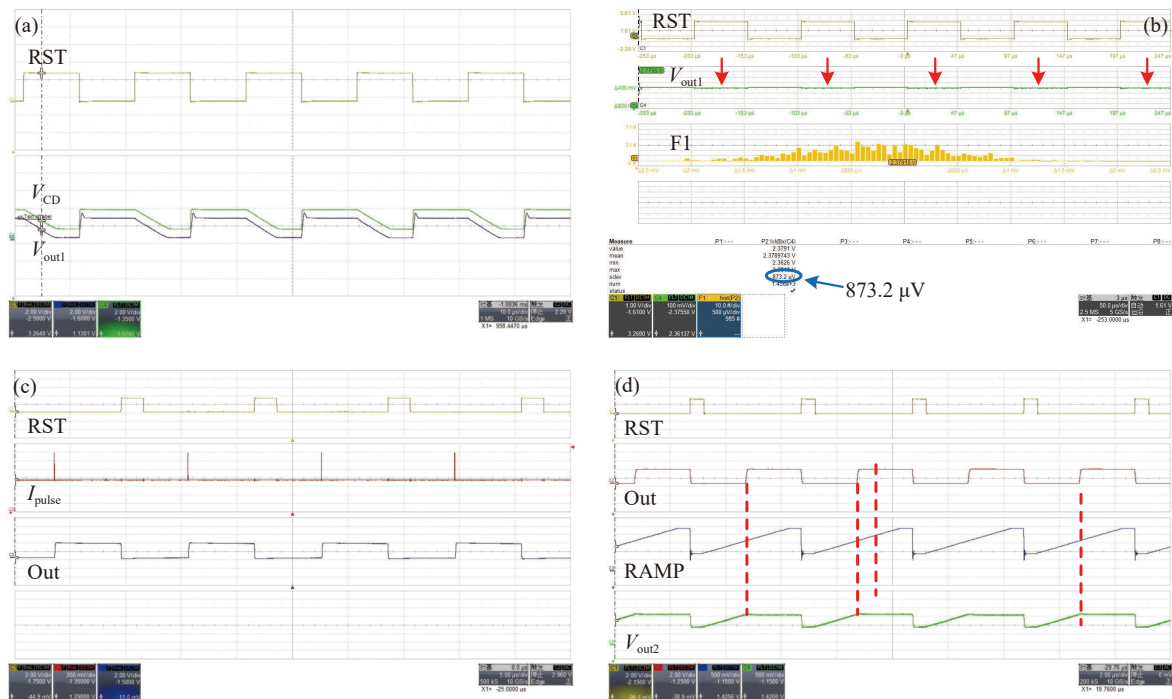


图 8 (a) CTIA 电路测试结果; (b) CTIA 电路噪声测试结果; (c) ALPD 电路测试结果; (d) TLRF 电路测试结果

Fig.8 (a) Test result of CTIA circuit; (b) Noise test result of CTIA circuit; (c) Test result of ALPD circuit; (d) Test result of TLRF circuit

随后测试电路噪声,观察零电流输入条件下的输出电压。图 8 (b) 是 CTIA 电路在低增益模式下的噪声测试结果,图中 F1 通道为输出电压的直方图统计

结果。在积分阶段的中间时刻,示波器会检测并记录输出电压,如图中红色箭头所示,随后进行均方根运算,这样即可得到读出电路的噪声均方根。测试结果

显示,低增益模式下噪声均方根为 873.2 μV 。

代入公式 (1), 可以计算出低增益模式下读出电路的动态范围 DR 为 67.94 dB。

$$DR = 20\log_{10}(V_{max}/V_{noise,rms}) \quad (1)$$

式中: V_{max} 为输出摆幅; $V_{noise,rms}$ 为噪声均方根。

通过同样的方法, 得出高增益模式下读出电路的动态范围是 60 dB。

图 8 (c) 为异步激光脉冲检测电路的测试结果, 复位信号 RST 出现上升沿时输出端 Out 复位, 一旦电流脉冲 I_{pulse} 到来, 检测电路即刻输出高电平信号。测试中, 异步激光脉冲检测电路可有效检测脉宽为 2.2 ns、幅值为 0.8 μA 的脉冲电流。

图 8 (d) 为二维激光测距电路的测试结果。RAMP 为时间幅度转换器产生的斜坡信号, V_{out2} 是与 TOF 相关的模拟电压信号。图中复位信号 RST 变为低电平时, 斜坡信号开始线性上升, V_{out2} 跟随斜坡信号变化。一旦检测到电流脉冲, Out 就变为高电平, 同时 V_{out2} 停止变化, 这样就能根据 V_{out2} 获得 TOF, 计算出被探测目标的距离信息。

测试结果显示, 文中设计的多功能读出电路具有四种成像模式, 能够满足特定场合下的应用需求。该多功能读出电路与国际先进产品的性能对比如表 1 所示。对比显示, 文中设计的新型多功能 ROIC 具有一定先进性和实用性, 同时芯片的部分性能具有一定优势。

表 1 文中电路与国际先进产品的性能对比

Tab.1 Performance comparison between the circuit in this paper and international advanced products

Parameters	2011 ^[11]	2016 ^[12]	2021 ^[13]	This work
Array size	640×512	1280×1024	128×128	64×64
Technology/ μm	CMOS 0.18	CMOS 0.18	CMOS 0.18	CMOS 0.35
Imaging mode	Active and passive	Active and passive	Active and passive	Active and passive
Supply voltage/V	-	-	5	3.3
Pixel pitch/ μm	15	10	50	30
Maximum frame rate	Passive imaging - 350 Hz	Active imaging - 640 Hz Passive imaging - 160 Hz	-	Active imaging - 12.5 kHz Passive imaging - 500 Hz
Dynamic range/dB	High gain - 49 Low gain - 70	High gain - 49 low gain - 69	-	High gain - 60 Low gain - 68
Well capacity	High gain - 12 ke^- Low gain - 600 ke^-	High gain - 10 ke^- low gain - 1 Me^-	Fixed gain - 7 Me^-	High gain - 203 ke^- Low gain - 1.63 Me^-

4 结 论

文中提出了一种具有日光标准成像、微光成像、异步激光脉冲检测和二维激光测距四种成像功能的红外焦平面读出电路, 可实现主/被动成像。由于电路采用了结构复用、像素共享等方案, 像素面积仅为 30 μm 。文中在被动成像功能中加入了一种 T 型开关结构, 减小了漏电流, 从而扩展了电路动态范围, 高、低增益模式下动态范围均大于等于 60 dB。在主动成像功能中, 文中提出了一种高增益、面积紧凑的放大器结构, 实现了激光信号的高灵敏度检测。基于 TSMC 0.35 μm 工艺进行了流片验证, 测试结果表明, 电路具备四种成像功能, 除了因测试条件限制所以无法开展的 TOF 时间分辨率测试外, 其余性能达到国

际先进电路水平, 表明该电路结构满足多功能成像读出电路的要求, 在此基础上可以开展更大阵列的设计, 原型芯片验证成功。

参考文献:

- [1] Fan Jinxiang, Wang Feng. Analysis of the development of missile-borne IR imaging detecting technologies[C]/Proc of SPIE 10433, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV, 2017, 10433: 1-9.
- [2] Li Da, Li Yunxia, Meng Wen, et al. Application and development of laser active imaging technology [J]. *Electronics Optics and Control*, 2013, 20(9): 59-63. (in Chinese)
- [3] Wu Hongbo, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al. Common aperture optical system of single photon laser and medium wave infrared

- [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1260-1269. (in Chinese)
- [4] Zhang Hongwei, Ding Yalin, Ma Yingjun, et al. Design of infrared dual-band/dual-FOV imaging early warning system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1283-1294. (in Chinese)
- [5] Gromek D, Samczynski P, Radecki K, et al. Simultaneous active and passive SAR imaging—first results[C]//2020 21st International Radar Symposium, 2020: 240-244.
- [6] Wu Wenda, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Design of co-aperture antenna for airborne infrared and synthetic aperture radar [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 595-604. (in Chinese)
- [7] Li Yanjie, Jin Guang, Zhang Yuan, et al. Co-aperture optical system for imaging and laser transmitting [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 220-226. (in Chinese)
- [8] He Wenjing, Hu Jian, Chen Yuwei, et al. Real-time processing framework of common-aperture active and passive hyperspectral 3 D imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200249. (in Chinese)
- [9] Zhao Yiming, Li Yanhua, Shang Yanan, et al. Application and development direction of lidar [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, 35(5): 4-22. (in Chinese)
- [10] Borniol E D, Castelein P, Guellec F, et al. A 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array for passive and active 2 D and 3 D imaging[C]//Proceedings of SPIE 8012, Infrared Technology and Applications XXXVII, 2011, 801232: 1-7.
- [11] Langof L, Nussinson D, Ilan E, et al. Advanced multi-function infrared detector with on-chip processing[C]//Proceedings of SPIE 8012, Infrared Technology and Applications XXXVII, 2011, 80120 F: 1-13.
- [12] Fraenkel R, Berkowicz E, Bykov L, et al. High definition 10 μm pitch InGaAs detector with asynchronous laser pulse detection mode[C]//Proceedings of SPIE 9819, Infrared Technology and Applications XLII, 2016, 981903: 1-8.
- [13] Zhang Qiwen, Liang Qinghua, Guo Huijun, et al. Research on testing of active and passive HgCdTe APD detector in linear mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20200460. (in Chinese)
- [14] Mutlu A A, Rahman M. Two-dimensional analytical model for drain induced barrier lowering (DIBL) in short channel MOSFETs[C]//Proceedings of the IEEE, 2000: 340-344.