

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201805090

二极管型红外探测器数字输出型读出电路

高 曼¹, 叶 茂¹, 赵公元², 王佩瑶², 赵毅强¹

(1. 天津市成像与感知微电子技术重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 天津市红外成像技术工程中心, 天津 300072)

摘 要: 为实现红外焦平面数字化输出, 设计了一款片上集成行列级读出电路, 适应于 SOI(silicon on insulator)二极管型非制冷红外探测器阵列. 读出电路包括一个连续时间增量型二阶 sigma-delta 调制器和一个输出缓冲器, 其中二阶 sigma-delta 调制器包括跨导模块、跨导运算放大器构成的积分器模块、电流型 DAC 反馈模块以及比较器. 基于此提出的读出电路架构, 采用直接数字量化的方式, 完全省去了前端模拟放大单元电路. 利用连续时间增量型二阶 sigma-delta 调制器对输入信号驱动要求低的特点, 该电路可直接处理 SOI 二极管型红外探测器输出的相对微弱的电压信号, 并输出数字信号. 基于 SMIC 0.35 μm CMOS 工艺对电路进行了设计并流片验证, 供电电压 5 V, 读出电路版图通道宽度小于 30 μm , 适应探测器像素尺寸. 测试结果表明, 60 帧频读出时, 读出性能良好, 输出噪声 9 μV , 单通道功耗 450 μW , 面积 0.092 mm^2 . 该读出电路相比于普通片上集成行列级读出电路, 减小了面积和功耗, 简化了整个红外成像系统, 适用于低功耗、低噪声、高集成度的大面阵数字化红外传感器成像系统.

关键词: 红外焦平面; 读出电路; 数字输出型读出电路; 行列级读出电路; 二极管型红外探测器

中图分类号: TN432; TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)04-0040-06

Diode infrared detector ROIC with digital output

GAO Man¹, YE Mao¹, ZHAO Gongyuan², WANG Peiyao², ZHAO Yiqiang¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronic Technology (Tianjin University), Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Infrared Imaging Technology Engineering Center, Tianjin 300072, China)

Abstract: A line readout circuit with digital outputs is presented in this paper, which is suitable for SOI diode uncooled infrared focal plane arrays. The readout channel consists of a second-order sigma-delta modulator and an output buffer. The modulator includes an integrator, a current DAC, and a comparator. With the proposed circuit design which adopts direct digital quantification, traditional analog pre-amplifier circuits are no longer needed. Continuous time increment type sigma-delta modulator can be driven by weak signals, which is capable of dealing with relatively small signals outputted by SOI diodes. The readout circuit was designed and simulated with 5 V supply voltage and the readout channel width was limited below 30 μm to meet the requirement of pixel physical size. The tape-out was completed in SMIC 0.35 μm CMOS technology to further validate the effectiveness of this design. Test results show that the output noise was less than 9 μV with 60 Frame/s under room temperature, the power consumption of each channel was less than 450 μW with 5 V power supply voltage, and the area of each channel was 0.092 mm^2 . Compared with traditional readout circuits, the proposed circuit needs no pre-amplifier circuits nor off-chip ADC, which reduces the complexity of the system. This design can be used in low power, low noise, and high density large scale infrared imaging systems with less chip area and power consumption.

Keywords: IRFPA; readout circuit; digital output; line readout circuit; diode infrared detector

红外成像系统广泛应用于军事侦查、医疗诊断、工业探测、安防监控等各个领域^[1]. 其中非制冷型可在常温下工作, 大大降低了系统功耗及体积, 广受青睐^[2]. SOI 二极管型红外探测器作为非制冷型红外成像系统探测器的一种, 其可在标准 CMOS 工艺厂完成制作, 生产更加方便快捷, 具备大规模量产的

潜力, 有利于红外成像系统的集成与封装^[3]. 随着红外成像系统的发展, 更大的阵列、更低的功耗、更快的速度、更好的成像质量等成为发展的主要方向, 这对读出电路也提出了越来越高的要求, 而这些离不开一个关键技术, 片上集成 ADC 技术^[4]. 片上集成 ADC 技术包括: 芯片级、行列级、像素级^[5]. 其中芯片级 ADC 需要相当快的传输速度, 传输过程中信号易受干扰, 影响着成像质量, 且对于电路的功耗和面积没有优化. 像素级 ADC 受限于像素面积, 读出电路设计难度大. 行列级 ADC 输出信号为数字信号, 能够有效降低信号干扰, 且仅受像素一

收稿日期: 2018-05-17
基金项目: 国家自然科学基金(61604109); 国家高技术研究发展计划(2015AA042605)
作者简介: 高 曼(1992—), 女, 硕士;
赵毅强(1964—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 叶 茂, mao_ye@tju.edu.cn

维尺寸限制,而且对于信号转换的要求不高,是一种性价比较高的读出结构。

一般而言,对于行列级 ADC 读出电路设计来说,设计人员通常采用前端单元读出电路先将信号进行采样放大^[6],再送入片上集成 ADC 进行量化处理。对于大阵列的红外成像系统来说,上百列甚至上千列的读出通道,前端单元读出电路占据了整个读出电路系统的大部分版图、功耗以及读出时间,这极大的限制着红外成像系统的发展。中国 SOI 二极管型非制冷红外成像系统读出电路尚处于研发阶段,未有成熟商业产品^[7],研究 SOI 二极管型红外成像系统数字输出型读出电路具有重大意义。

基于此设计了一款完全省去了前端读出单元,直接处理 SOI 二极管型探测器输出的相对微弱的电压信号的行列级读出电路,并基于 SMIC 0.35 μm CMOS 工艺对电路进行了流片验证。

1 SOI 二极管型探测器工作原理

二极管的正向电流 I 与温度 T 的关系符合以下关系式:

$$I = A J_0 \left[\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

$$J_0 = M T^{(3+\gamma/2)} \exp\left(-\frac{q(V_F - V_{g0})}{kT}\right). \quad (2)$$

式中: A 为 PN 结面积; J_0 为电流密度; q 为电子电荷量; V_F 为正向偏置电压; k 为玻尔兹曼常数; M 为与温度无关的常数; γ 为一个常数; V_{g0} 为绝对零度时导带底和价带顶的电势差。

从关系式(1)、(2)可以看出,当流经二极管的电流恒定时,外界温度变化引起正向偏置电压 V_F 的变化。单个二极管的电压温度灵敏度为 $-1.3 \sim -2.0 \text{ mV/K}$ ^[8], SOI 二极管型探测器每个像素由 6 个二极管串联构成,灵敏变化度为 $-7.8 \sim -12.0 \text{ mV/K}$ 。根据光学系统红外传输模型和二极管探测器热转换效率指标计算得出,场景温度每变化 1 K,探测器阵列表面温度变化 10 mK。文中针对 6 个二极管串联的探测器进行设计,探测器电压温度灵敏度为 8 mV/K 。由上述分析可知,场景温度变化 100 mK,二极管探测器信号变化 $8 \mu\text{V}$,对于 $\text{NETD} < 100 \text{ mK}$ 的设计,需要读出电路等效输入端噪声小于 $8 \mu\text{V}$ ^[9]。二极管型探测器温度响应比传统电阻型探测器低 1~2 个数量级^[10],给读出电路设计带来了巨大的挑战。

2 读出电路整体架构

2.1 整体电路

按照设计要求,SOI 二极管型探测器阵列大小

为 384×288 ,像素单元 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,噪声等效温差 (NETD) 小于 100 mk,帧频 60 F/s。本文拟设计的读出电路框图如图 1(b) 所示的无前端读出单元的行列级读出电路,完全省去了如图 1(a) 所示的行列级读出电路的读出单元模块。

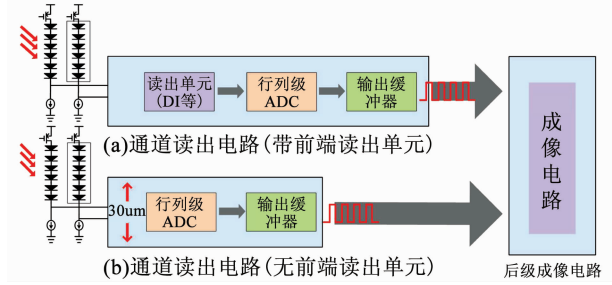


图 1 行列级数字读出电路框图

Fig. 1 Frame of line digital output readout circuit

电路设计难点: 1) 完全省去前端模拟放大电路的情况下直接处理 SOI 二极管探测器微弱的响应信号。这要求读出电路具有一定的噪声抵制能力,保证微弱的信号不被噪声淹没,而影响成像质量。2) 像素单元尺寸小,宽度仅为 $30 \mu\text{m}$,这就限制读出电路宽度只能为 $30 \mu\text{m}$ 。这要求读出电路的结构需要降低复杂度。

基于以上设计难点,综合考虑选用了全差分连续时间二阶增量型 sigma-delta 调制器作为本设计的行列级读出电路。基于过采样技术和噪声整形技术,该种结构具有降低低频噪声的特点,同时具有对信号驱动能力要求低的特点^[11],能够直接对探测器盲元和暗元的电流信号进行处理,不再需要将探测器信号放大再送入 ADC 进行量化处理,可省去前端模拟放大电路。但版图宽度 $30 \mu\text{m}$ 对设计而言仍为较大挑战,在具体电路实现中,尽量选用简单结构。

行列级读出电路整体架构如图 2 所示。电路主要由一个连续时间增量型二阶 sigma-delta 调制器和一个输出缓冲器构成。调制器主要包括积分器、比较器和起反馈作用的电流型 DAC。

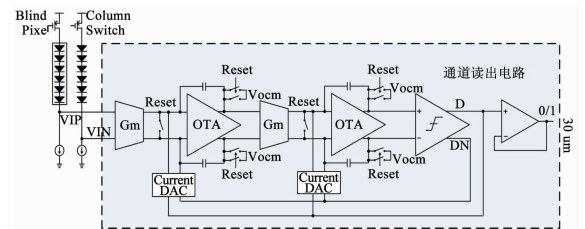


图 2 读出电路结构

Fig. 2 The readout circuit

根据滚筒式成像原理,通道的读出时间 t 可表示为

$$t = 1/F / (C/2). \quad (3)$$

式中: F 为帧频, C 为探测器阵列列数. 系统帧频大于 60 f/s, 阵列规模为 384×288 , 根据式(3) 计算得每个通道的读出时间为

$$t = 1/60/(288/2) = 116 \mu\text{s}.$$

在该读出时间范围内, 时钟周期 2.5 M 的情况下, 可实现的最大过采样率为 256, 电路应在此条件下进行仿真设计.

系统探测 100 K 温度变化, 实际探测器信号电压变化约 8 mV, 要实现噪声等效温差小于 100 mK, 电路等效输入噪声小于 8 μV , 为了确保在非均匀影响、电压掉落影响和环境温度变化的情况下仍能正确处理信号, 留出余量, 设计输入电压范围为 40 mV, 设计电路信噪比需大于 74 dB 时, 方满足 NETD 小于 100 mK 的需求.

2.2 降噪原理

在红外辐射作用下, 探测器二极管正向偏压发生变化, 引起输出信号变化, 记为 $x(kT)$, $x(kT)$ 经一阶积分器转换为电压信号 $u(kT)$, $u(kT)$ 再传输到二阶积分器进行同样的处理, 得到二阶积分器的输出信号 $v(kT)$, 经比较器得到比较结果 D 和 DN, D 作为输出信号经输出 Buffer 输出, DN 控制两个 DAC, 得到反馈信号 $q(kT)$, 在读出时间内不断反馈到 OTA 输入端进行反馈调节, 进行噪声整形, 实现低噪声信号读出.

一阶积分器的输出 $u(kT)$ 可以表示为

$$u(kT) = x(kT - T) - q(kT - T) + u(kT - T),$$

二阶积分器的输出 $v(kT)$ 可以表示为

$$v(kT) = u(kT - T) - q(kT - T) + v(kT - T).$$

比较器的量化误差可以表示为输出和输入之差:

$$Q_e(kT) = y(kT) - v(kT),$$

DAC 可以认为是理想的, 因此有

$$y(kT) = q(kT),$$

联立得二阶调制器的传输函数为

$$y(kT) = x(kT - T) + Q_e(kT) - 2Q_e(kT - T) + Q_e(kT - 2T).$$

最终输出为延迟的输入加上量化噪声 Q_e 的二阶差值, 将量化噪声信号推向高频, 减少了低频噪声, 实现了噪声整形, 完成读出电路的低噪声信号处理.

3 电路实现

3.1 积分器

积分器是整个行列级读出电路的主要组成部分, 其中跨导放大器 (transconductance amplifier) 是积分器的重要组成部分. 传统模拟读出电路中使用

的跨导模块的跨导值直接决定电路增益, 而本文当中跨导模块的跨导值与增益无关, 只是将跨导模块应用在反馈环路中实现数字量化的作用. 为了减小跨导运算放大器 OTA 的等效输入噪声, 需要尽量提高 OTA 的增益. 常见的提高增益的方法是采用共源共栅结构 (cascode) 和增益提高 (gainboost) 结构, 但 Gainboost 结构需要额外的运放^[12], 很难控制在 30 μm 的版图宽度内. 故本设计选用 Cascode 结构. 包括 OTA 的积分器电路图如图 3 所示. OTA 运算放大器如图 4 所示, 相比传统折叠共源共栅运算放大器而言, 该电路增加了 M9-M11 管, 起到提高增益的目的.

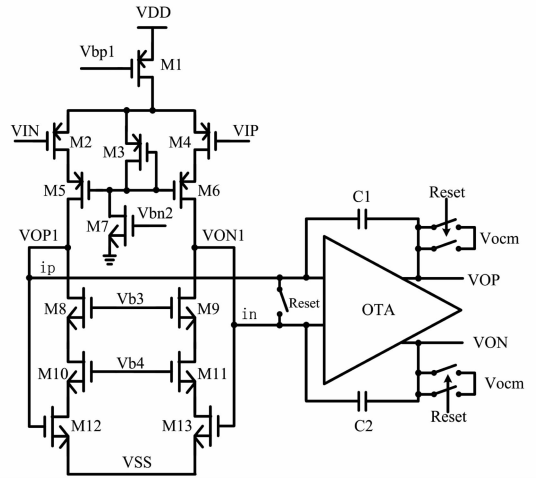


图 3 积分器电路原理图

Fig. 3 Schematic of integrator circuit

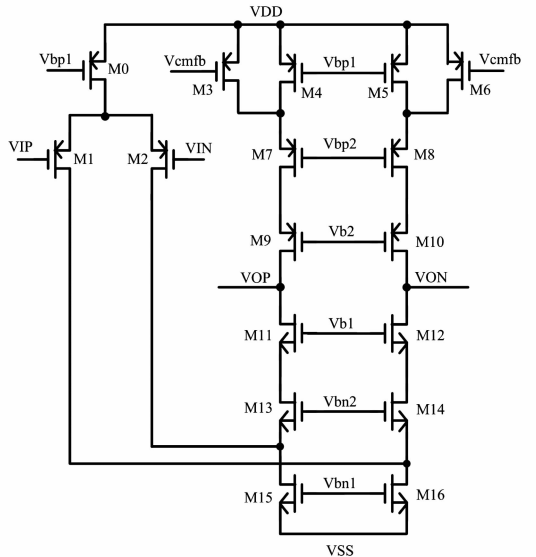


图 4 积分器内 OTA 电路

Fig. 4 Schematic of OTA circuit in integrator

根据小信号模型推导出该结构的输出阻抗为

$$R_{out} = (g_{m9}r_{o9}g_{m7}r_{o7}(r_{o4}/r_{o3}))/((g_{m11}r_{o11}g_{m13}r_{o13}(r_{o15}/r_{o2})),$$

增益为

$$A_v = -g_{m2} \{ (g_{m9}r_{o9}g_{m7}r_{o7}(r_{o4}/r_{o3}))/ / (g_{m11}r_{o11}g_{m13}r_{o13}(r_{o15}/r_{o2})) \} .$$

式中: g_m 为 MOS 管跨导, r_o 为 MOS 管的输出电阻. 从增益表达式可以看出,相比于传统折叠共源共栅运算放大器而言,该电路增益提高了 $g_{m9}r_{o9}/g_{m11}r_{o11}$ 倍. 由于在高增益放大器中,全差分电路输出共模电平对器件的特性和失配相当敏感^[13],电路增加了共模反馈结构.

3.2 比较器

根据上述计算,读出电路读出时间小于 116 μs ,在满足过采样率 256 的条件下,比较器需增加预放大电路以提高比较器速度和分辨率^[14]. 电路选用了带有预放大的动态比较器,如图 5 所示,包括一个带有源负载的预放大器和一个动态锁存器.

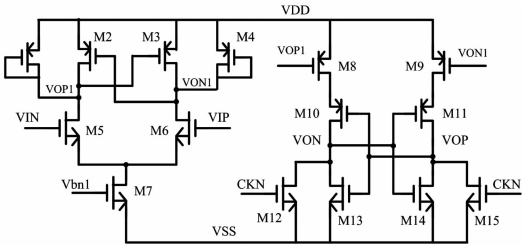


图 5 比较器

Fig. 5 Schematic of comparator

当 CKN 为高电平时,比较器进行复位,VON 和 VOP 电压将被拉至地. 当 CKN 为低电平时,比较器正常工作. 信号经预放大器放大后进入动态锁存器,为了说明问题,假设 VOP1 电压比 VON1 电压低,根据电流平方律公式:

$$I = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 ,$$

M8 所在支路电流将大于 M9、所在支路电流,经过一段时间就会出现 VON 电压大于 VOP 电压,该电压经过 M10、M11、M13 和 M14 形成的正反馈网络放大后,将 VOP 电压拉至地,完成信号比较.

4 仿真与测试

在过采样率为 256,输入为频率 2 kHz、幅度 40 mV 的正弦信号时,进行仿真. 将仿真结果进行 DFT 分析,得到如图 6 所示频谱图,分析结果显示,电路能够实现 79.6 dB 的信噪比,大于 74 dB 的信噪比要求.

为适应探测器像素尺寸 30 μm 的要求,读出电路的版图宽度为 30 μm . 基于 SMIC 0.35 μm 工艺设计了 32 通道读出电路并进行了流片,芯片照片如图 7 所示.

为验证芯片的读出情况,在常温下对芯片进行

测试,5 V 供电,进行了两种输入信号的读出测试,信号幅值均为 40 mV. 如图 8(a)、(b)所示分别为输入正弦信号和方波信号时的读出数字码字情况,从电路的读出情况来看,数字信号会随输入信号有明显的响应,当输入幅度逐渐增大时,高电平变多,输入幅度变低时,低电平变多,具有明显的疏密变化. 将输出码字通过逻辑分析仪采样后,可以还原出输出波形图. 图 8(c)、(d)所示分别为正弦输入信号和方波信号时对应的读出数字信号进行处理后恢复的图像. 读出图像为明显的正弦信号和方波信号,读出效果良好.

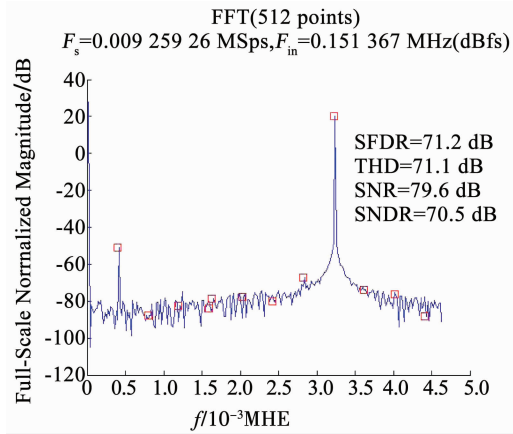


图 6 FFT 分析频谱图

Fig. 6 FFT analysis spectrum

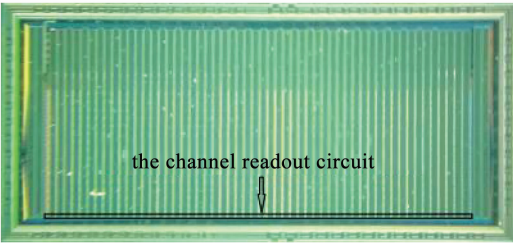


图 7 芯片照片

Fig. 7 Image of chip

图 8 所示读出图像说明读出电路具备 60 帧频的基本读出功能,但是否满足噪声等效温差小于 100 mK 的设计指标仍需进一步验证,为此,对芯片进行了噪声测试,图 9 为噪声测试结果.

通过恢复图像可以看出,电路输出噪声 9 μV . 对 32 通道读出电路进行噪声测试,最大噪声 4 LSB,即 9 μV . 上述电路仿真结果显示,电路 SNR 为 79 dB,自身噪声约为 4.5 μV ,小于 8 μV . 但是由于输入端热噪声影响,实测噪声性能会恶化. 实际测试时,输入端噪声仅由输入端电容大小决定电容值约为 4 pF,根据 $\sqrt{kT/C}$ 公式计算得到对应输入端热噪声约为 32 μV . 经过本文中读出电路电路量化过程中对输入信号的滤波降噪,最终实现 9 μV 输入噪声的指标.

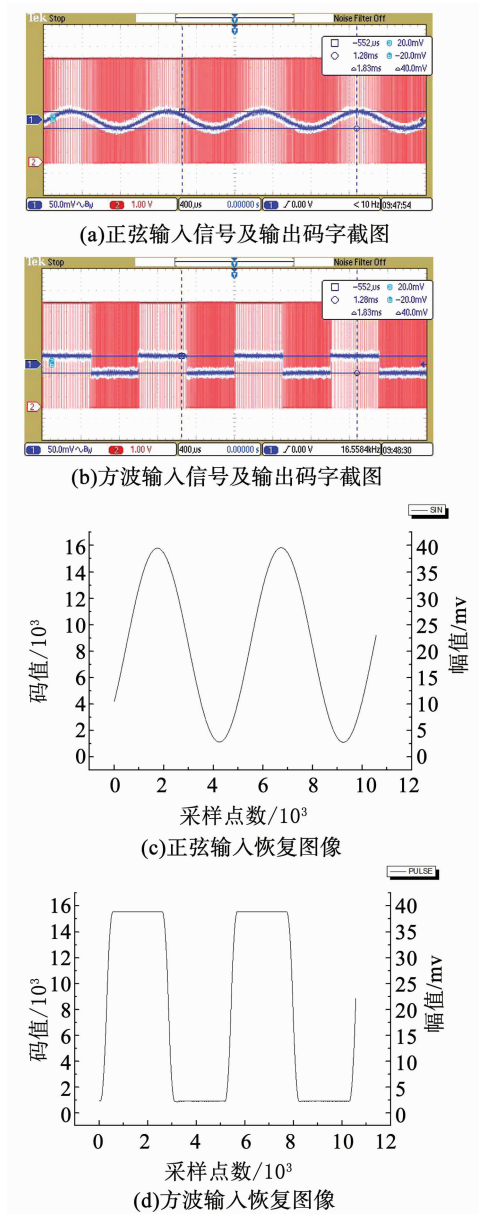


图 8 输入信号测试图及读出图像

Fig. 8 Input signal test diagram and readout image

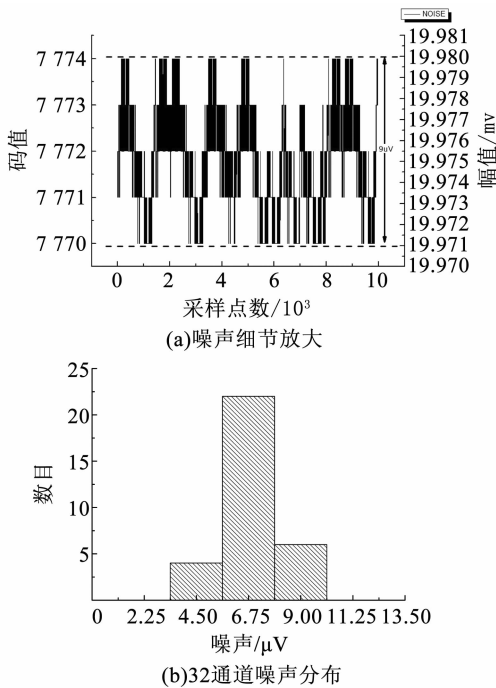


图 9 噪声测试结果

Fig. 9 Noise test results

为进一步评估本研究工作的水平,与相关文献进行了对比,见表 1. 表 1 中本文性能与其他参考文献相比较,本文设计的读出电路具备低噪声特点. 同时,省去了前端模拟放大电路,节约了该部分的面积和功耗.

5 结 论

1) 本文基于全差分连续时间二阶增量型 sigma-delta 调制器,实现了一款片上集成数字输出的读出电路,完全省去了前端模拟放大读出单元,可直接处理二极管型红外探测器探测到的微弱电压信号.

2) 电路基于 SMIC 0.35 μm 工艺设计并流片验

表 1 本文性能与其他参考文献对比

Tab. 1 Comparison of the performance in this paper with other references

参数	文献[15]	文献[6]	文献[9]	文献[16]	本文
探测器阵列	640 × 512	512 × 512	320 × 240	NA	384 × 288
探测器类型	电阻型	电阻型	二极管	二极管	二极管
工艺/ μm	0.50	0.35	NA	NA	0.35
像素尺寸/ μm	25	30(通道宽度 60)	40	35	30(通道宽度 30)
通道面积/ mm^2	NA	>0.520 8	NA	NA	0.092 0
数字化输出	否	是	否	NA	是
前端模拟功耗	NA	NA	NA	NA	0
数字量化功耗/ μA	NA	91	NA	NA	90
等效输入噪声/ μV	579.6	ADC 输入噪声 > 8 mV	28.2(6 σ)	2.0	9.0

证,读出电路通道版图宽度 30 μm,适应探测器 30 μm像素尺寸要求。读出电路工作于常温,通过施加不同输入信号对电路进行了测试,供电电压 5 V,测试结果表明,该读出电路在帧频为 60 f/s 的情况下,能够进行电压范围为 40 mV 的信号读出,噪声小于 9 μV,单通道功耗为 450 μW。

参考文献

[1] MENG Xiangyun, ZHANG Yacong, LIU Sanlin, et al. Low power readout circuit for 384 × 288 uncooled IRFPA with novel readout stage[C]//Proceedings of the International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit. Bangkok, Thailand: IEEE, 2012. DOI:10.1109/EDSSC.2012.6482835

[2] LIU C C, MASTRANGELO C H. A CMOS uncooled heat-balancing infrared imager[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(4): 527. DOI:10.1109/4.839912

[3] ZHAO Gongyuan, YE Mao, HU Kai, et al. A ROIC for diode uncooled IRFPA with hybrid non-uniformity compensation technique[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(2): 501. DOI:10.1109/JSEN.2017.2773538

[4] 刘传明,姚立斌. 红外焦平面探测器数字读出电路研究[J]. 红外技术, 2012, 34(3): 125

LIU Chuanming, YAO Libin. Study on digital readout circuit for infrared FPA detectors[J]. Infrared Technology, 2012, 34(3): 125

[5] 姚立斌,陈楠,张济清,等. 数字化红外焦平面技术[J]. 红外技术, 2016, 38(5): 357

YAO Libin, CHEN Nan, ZHANG Jiqing, et al. Digital IRFPA technology[J]. Infrared Technology, 2016, 38(5): 357

[6] 高磊,翟永成,梁清华,等. 红外焦平面读出电路集成数字输出[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1686

GAO Lei, ZHAI Yongcheng, LIANG Qinghua, et al. IRFPA ROIC integrated digital output[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(6): 1686

[7] 赵国芬,赵毅强,赵公元,等. 二极管型非制冷红外探测器的前端电路设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 161

ZHAO Guofen, ZHAO Yiqiang, ZHAO Gongyuan, et al. Design of front-end circuit for uncooled diode infrared detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 161. DOI: 10.3788/IRLA201645.0104001

[8] 王玮冰,陈大鹏,明安杰,等. 二极管原理非制冷红外焦平面阵列的集成设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 997

WANG Weibing, CHEN Dapeng, MING Anjie, et al. Integration of

uncooled diode infrared focal plane array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 997

[9] ISHIKAWA T, UENO M, NAKAKI Y, et al. Performance of 320 × 240 uncooled IRFPA with SOI diode detectors[C]//Proceedings of the SPIE. San Diego, CA: SPIE, 2000: 152. DOI:10.1117/12.409857

[10] NESHER O, PIVNIK I, ILAN E, et al. High resolution 1 280 × 1 024, 15 μm pitch compact InSb IR detector with on-chip ADC [C]//Proceedings of the SPIE. Orlando, Florida: SPIE, 2009. DOI:10.1117/12.817054

[11] ZENG Xinji, GAO Jing, YANG Liu, et al. An extended-counting incremental sigma-delta ADC with hardware-reuse technique[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2016, 25(5): 1650038. DOI:10.1142/S0218126616500389

[12] AHMADI M. M. A new modeling and optimization of gain-booster cascode amplifier for high-speed and low-voltage applications[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2006, 53(3): 169. DOI:10.1109/TCSII.2005.858493

[13] 刘婷婷,喻明艳. 带共模反馈的 CMOS 套筒式高增益运算放大器[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(5): 783

LIU Tingting, YU Mingyan. High gain CMOS telescopic operational amplifier with common-mode feedback [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(5): 783

[14] 吴笑峰,刘红侠,石立春,等. 新型高速低功耗 CMOS 动态比较器的特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1354

WU Xiaofeng, LIU Hongxia, SHI Lichun, et al. Characteristic analysis of a new high-speed and low-power CMOS dynamic comparator[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(5): 1354

[15] LV Jian, QUE Longcheng, WEI Linhai, et al. Uncooled microbolometer infrared focal plane array without substrate temperature stabilization [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(5): 1533. DOI:10.1109/JSEN.2014.2298512

[16] 黄卓磊,王玮冰,蒋文静,等. 一种具有高填充因子吸收层和低失调低噪声读出电路的红外探测系统[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(1): 50

HUANG Zhuolei, WANG Weibing, JIANG Wenjing, et al. Infrared detectors with high fill-factor absorber and low offset low noise readout circuit[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(1): 50. DOI:10.3724/SP.J.1010.2014.00050

(编辑 张 红)