光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024030701

线性碲镉汞 APD 的高速焦平面读出电路研究

孙　铎[1,2]，梁清华[1]，丁瑞军[1*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室，上海 200083；
2. 上海科技大学 信息科学与技术学院，上海 201210）

摘　要： 设计了一款针对线性模式碲镉汞 APD 的高速成像读出电路。像元内基于三级推挽放大器级联的电阻反馈跨导放大器(RTIA)，实现了光电流的实时线性转换，并利用工作于亚阈值区的 MOS 管作为反馈电阻实现跨阻增益可调；利用电容补偿法对 RTIA 的相位裕度进行优化，解决了低增益下的输出振荡现象。结果显示，像元内 RTIA 跨阻增益可调范围达 100～140 dB，增益带宽积可达 10^{14} 数量级，像元电路输出延时低于 1.8 ns。设计了像素外的飞行时间测量电路，采用两段式时间数字转换器分别进行飞行时间的大范围粗量化和高精度细量化，测量范围可达 1 530 m，测量精度为 106.5 cm，线性度高于 99.99%。

关键词： 线性 APD；有源电阻反馈跨导放大器；飞行时间测距；TDC

中图分类号： TN312.7　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0550－08

Research on High-Speed Circuit of Line-Mode HgCdTe APD

SUN Duo[1,2], LIANG Qinghua[1], DING Ruijun[1]

(1. National Key Lab. of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. School of Information Science and Technol., ShanghaiTech University, Shanghai 201210, CHN)

Abstract: A high-speed imaging readout circuit for a linear-mode HgCdTe APD was proposed. A resistive feedback transimpedance amplifier (RTIA) with adjustable transimpedance gain was used in the image element to realize the real-time linear conversion of the photocurrent, and the phase margin of the RTIA was optimized using the capacitive compensation method to solve the output oscillation phenomenon at low gain. The results showed that the RTIA transimpedance gain within the image element was 100～140 dB, the GBW could be improved by 10^{14} times, and the output delay of the image circuit was lower than 1.6 ns. A column-level time-of-flight measurement circuit and a two-stage time-to-digital converter were used for the wide-area coarse quantization of the time-of-flight and high-precision fine quantization, respectively. The measurement range was up to 1 530 m, with a measurement accuracy of 106.5 cm and a linearity of greater than 99.99%.

Key words: line mode APD; RTIA; time of flight ranging; time digital converter

0　引言

第三代碲镉汞红外焦平面探测器技术在光电系统中得到广泛应用，其主要特点是高增益、高灵敏度、高速探测。其中，三维成像是第三代焦平面主要发展方向之一[1]。用于三维激光雷达的主动探测可以获得物体的距离信息，红外辐射被动探测可以获得物体的灰度信息，主被动结合的探测方式具有极强的抗干扰能力，能够识别被遮挡的目标、穿透气体颗粒物和大气湍流，近年来该技术在安防识别、大气

收稿日期：2024－03－07.

* **通信作者：**丁瑞军

探测、气体浓度检测等领域获得长足发展。美国的DRS公司和NASA共同研制出用于检测大气中的CO_2和CH_4气体的IPAD激光雷达探测器，APD可提供150～654的动态范围，基于电阻反馈跨导放大器（RTIA）的定制化读出电路最大带宽可达6 MHz，平均上升时间为51 ns[2]。

探测器接收到目标反射的回波信号，通过APD将回波信号转化为可被处理的电信号。工作在高反偏压下的APD利用载流子的雪崩效应产生远大于普通光电二极管的增益因子和极低的过剩噪声，在高速探测、微弱信号乃至单光子探测中均有广泛的应用。APD工作模式分为线性模式（Line-Mode，LM）和盖革模式（Geige-Mode，GM）。LM-APD工作电压低于雪崩电压，其放大倍数随所加偏压增大而线性增大，其具有以下显著优势：(1)无需淬灭处理，可识别连续光信号；(2)没有后脉冲效应，能够分辨时间间隔很近的光子；(3)既可获得目标的灰度信息又可获得目标的深度信息[3]。HgCdTe材料具有可调的响应波长和非常大的电子空穴离化系数差异，工作在线性模式的HgCdTe APD是微弱信号探测、三维主被动探测应用的重要器件。2021年，NASA开发了一种新型太空激光雷达，研制了2×8线性模式单光子计数的HgCdTe APD焦平面阵列探测器，具有0.9～4.3 μm波长的光谱响应，可调的APD增益提供0～1 000的大动态范围，结合激光功率调节，测量范围可达数百千米[4]。

三维成像的读出电路具有较快的响应速度、较低的噪声和较大的动态范围，LM-APD的读出通常采用电流输出和电荷输出方式，基于RTIA的电荷输出方式具有高跨阻增益和高速连续转换的特点，相比基于CTIA的电流输出方式消除了积分时间和复位时间的影响，可实时先行转换输入电流。美国DRS公司设计研制了一款HgCdTe e-APD线性模式光子计数焦平面阵列，其探测光谱范围横跨可见光到中波红外，读出电路包含跨阻值为315 kΩ的RTIA，在50 fF的探测器等效电容下带宽可达129 MHz[5]。

本文提出一种带有相位补偿的增益可调RTIA结构，利用工作在亚阈值的MOS管取代多晶硅电阻，在不同应用场景下实现阻值调节，解决了在低增益下相位裕度不足导致的输出振荡问题，跨阻增益可调范围为108～140 dB，在500 fF的探测器电容下带宽可达600 MHz。并在此基础上设计了一款可应用于线性阵列的全数字飞行时间（ToF）电路，采用时间数字转换器（TDC）进行粗量化，余量提取后利用延时链TDC进行细量化，满足小于0.5 ns的测量精度需求。

1 读出电路设计

为快速读出LM-APD的输入信号，判断光子的到达时间，获取目标物体的灰度信息和深度信息，设计了适用于主被动探测的数模混合读出电路。读出电路的架构和信号链路如图1所示，包含规模为16×1的像元阵列，由两级TDC组成的ToF电路、读出选择控制电路、模拟输出缓冲级电路、驱动级电路等结构。像元内结构如图2所示，由APD探测器将回波信号转换微弱电流信号，通过RTIA注入级转换为电压信号并放大至可被后续电路处理的电压幅值，在红外热成像模式下经采样和缓冲电路后输出连续电压信号，在激光雷达测距模式下通过迟滞比较器将放大后的电压幅值进行阈值比较，产生数字脉冲作为到达时刻信号输出。

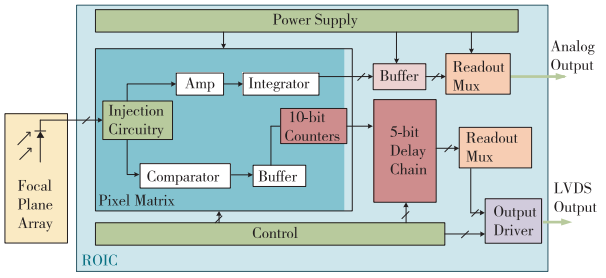


图1 读出电路架构

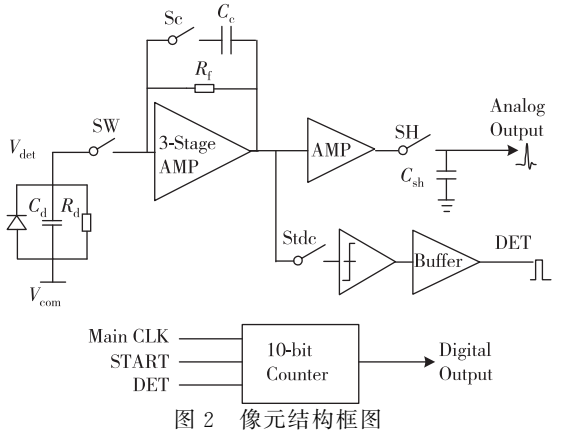


图2 像元结构框图

1.1 RTIA结构分析

RTIA是对高反偏APD电流线性放大的核心，决定了像元的响应速度和精度。在设计时需要考虑以下指标：(1)为提高微弱电流信号的可识别度，跨阻增益应尽可能的高；(2)光生电流信号是一个纳秒

级窄脉冲，RTIA 带宽应足够大从而减小峰值时间(Time-to-Peak，TTP)达到快速响应的目的；(3)在有限的像元面积内可以实现高增益高工作频率的跨阻放大。

图 3 所示的 RTIA 闭环拓扑结构具有两个特性：(1)跨阻增益取决于反馈电阻的阻值；(2)输入节点处的时间常数 τ 对 RTIA 的带宽起到限制作用。为同时满足以上特性，设计了推挽放大器级联结构的 RTIA。如图 4 所示为单极推挽跨阻放大器结构，晶体管 M1 和 M3 组成了反相器，MOS Diode M2 则是为了增加单极带宽和最小化米勒效应。将跨阻去耦合后等效到输入输出端，可获得如图 5 所示的小信号等效电路，由于负反馈环路的作用，电路可通过分压实现静态工作点自主偏置在 VDD/2，其开环增益可写为：

$$A_0=\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{g_{m1}+g_{m3}}{g_{m2}}=\frac{\sqrt{2\mu_nC_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_1 I_{ds1}}+\sqrt{2\mu_pC_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_3 I_{ds3}}}{\sqrt{2\mu_nC_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_2 I_{ds2}}}=\alpha+\sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}\beta(1+\alpha)} \tag{1}$$

其中：

$$\alpha=\frac{W_1/L_1}{W_2/L_2},\beta=\frac{W_3/L_3}{W_2/L_2} \tag{2}$$

图 6 为所提出的 RTIA 具体结构，由三个上述推挽放大器级联而成，将跨阻设计为工作在亚阈值区的栅压可调 PMOS 管以实现多档跨阻增益，同时设计了相位补偿结构以增强低增益情况 RTIA 的稳定性。

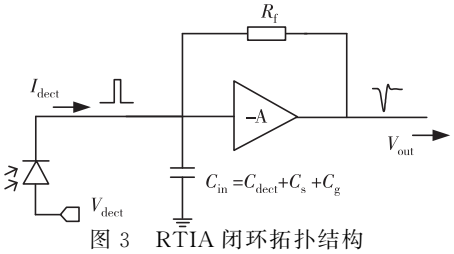


图 3　RTIA 闭环拓扑结构

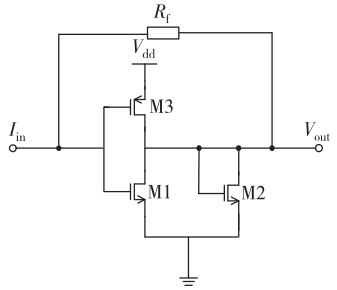


图 4　单极推挽结构跨阻放大器

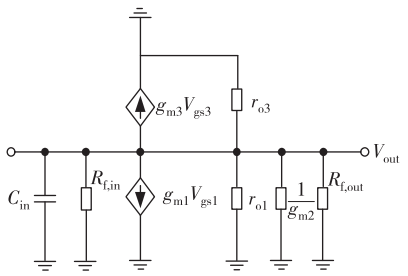


图 5　单级推挽放大器小信号等效电路

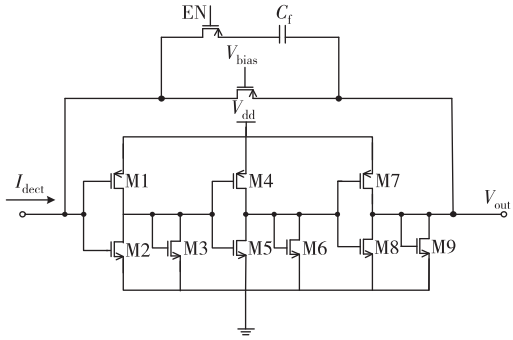


图 6　三级级联推挽放大器 RTIA

输入电流全部流经反馈电阻 R_f，跨阻增益的公式为：

$$A_R=\frac{V_{out}}{I_{detc}}=\frac{I_{detc}R_f}{I_{detc}}=R_f \tag{3}$$

工作在亚阈值区的 MOS 器件本身可以实现数量级为 10^{11} 甚至以上的阻值[6]，在合适的偏置条件下，可以用作线性电阻。

放大器的开环增益，三级相同的结构对应三个相同的时间常数，在信号的传输通路上引入三重实极点。

$$p_1=p_2=p_3=\frac{1}{R_1C_1} \tag{4}$$

R_1 主要由 MOS Diode 负载决定，而 MOS Diode 阻抗为 gm^{-1} 量级，C_1 主要由 MOS 管的栅电容决定，为几十飞法量级，因此系统有着相当高的开环极点频率。跨接电阻后，等效到输入端的电阻为：

$$R_{f,in}=\frac{R_f}{A_g-1} \tag{5}$$

$R_{f,in}$ 远大于 gm^{-1}，输入节点处时间常数的频率被拉低，远小于级间极点频率，作为主极点其表达式为：

$$p_{in}=\frac{A_g-1}{R_fC_{in}} \tag{6}$$

跨阻放大器的带宽近似于：

$$f_{-3\,dB}=\frac{A_g-1}{2\pi R_fC_{in}} \tag{7}$$

利用工作在亚阈值区的 PMOS 管作为压控有源反馈电阻，这种设计有效减小了电阻的面积并减小了并联电容，解决了多晶硅电阻工作频率低的问题。通过调节栅压来增大或减小跨增益，对于不同数量级的探测电流可实现动态调节。

1.2 相位补偿方法

在多级点系统中，稳定性是一个必须考虑的因素，通过公式(4)可知，在开环增益提高或跨阻增益降低时，带宽随之增大，但是主极点也逐渐靠近次极点，造成相位裕度不足的影响，幅频响应曲线会出现增益隆起的现象，称为幅频峰化。在多个对 RTIA 结构进行研究的文章中出现此种现象[7-8]。相位裕度不足导致的不稳定性，使输出曲线产生较大的过冲甚至严重的振荡。通过分析，可提高稳定性的方法有以下三种：(1)减小开环增益；(2)增大反馈回路上的跨阻值；(3)增大输入节点处的电容。结合电路的应用场景，在反馈回路上跨接一个低容值电容和控制开关 EN。当红外被动成像模式启用时，由于红外辐射较微弱，产生光电流较小，所需跨阻增益较大，此时关闭控制开关 EN，调高 PMOS 栅压，可起到增大跨阻的作用。当激光雷达测距模式启用时，APD 生成的光电流较大，所需跨阻增益较小，此时打开控制开关 EN，补偿电容发挥作用，增大输入节点处的电容，在不影响增益的情况下大大增强系统的稳定性。

基于过补偿跨阻放大器的噪声增益波特图的分析，进行对最小补偿电容的选取，定义 f_i 为未加补偿电容时噪声增益曲线与运放开环增益曲线的交点，f_N 为补偿后的交点，f_{GBW} 为运放开环增益为 1 时的单位增益频率，f_i 与 f_z 和 f_{GBW} 的关系为：

$$f_i = \sqrt{f_z \times f_{GBW}} \tag{8}$$

在临界补偿情况下 $f_i = f_p$，则上式可写为：

$$\frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{R_f C_f} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{R_f \cdot (C_f + C_{det})} \times f_{GBW}} \tag{9}$$

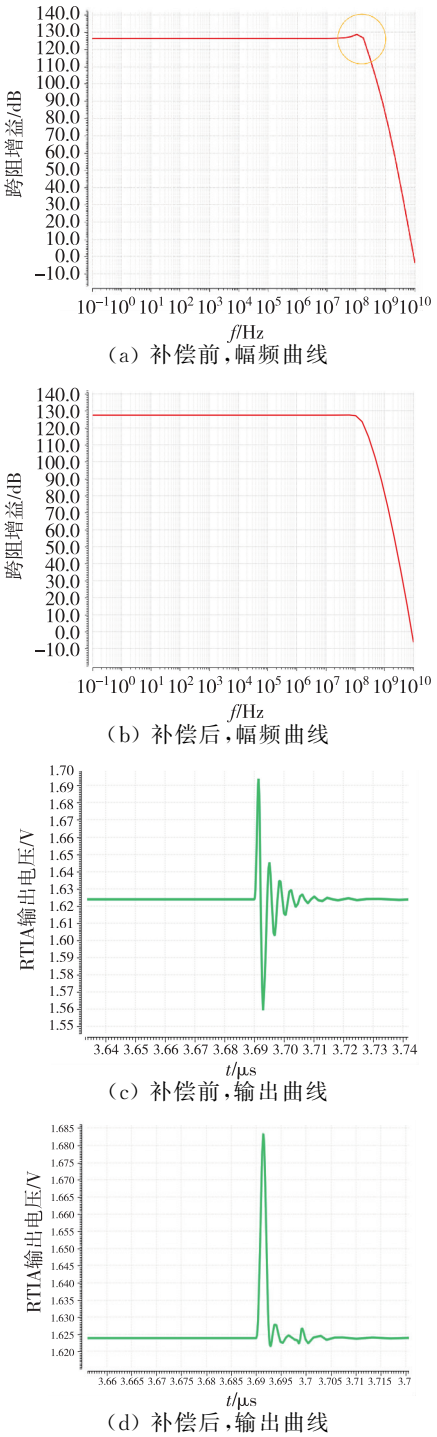
经展开计算可得最小补偿电容表达式：

$$C_f = \frac{(1 + \sqrt{1 + 8\pi \cdot R_f \cdot C_{det} \cdot f_{GBW}})}{4\pi \cdot R_f \cdot f_{GBW}} \tag{10}$$

由于本文中探测器电容远远大于补偿电容，可做 $(C_f + C_{det}) \approx C_s$ 的简化，得到最小补偿电容简化运算公式：

$$C_{f(min)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{C_{det}}{R_f \times f_{GBW}}} \tag{11}$$

如图 7 所示为相位补偿前后的对比图，可以看出，加了补偿电容后幅频峰化现象消失，过冲与振荡现象有显著改善。



(a) 补偿前，幅频曲线

(b) 补偿后，幅频曲线

(c) 补偿前，输出曲线

(d) 补偿后，输出曲线

图 7 相位补偿前后 RTIA 的幅频曲线和输出曲线

2 飞行时间电路设计

ToF 的测量结构一般分为时间电压转换器(TVC)和 TDC。TVC 也被称为模拟 TDC，其特点

是将时间间隔转换为电压信号，常用的转换方法是使用一个由时间测量开始和结束信号控制的积分器，TVC 的优点是测量精度非常高，可达皮秒级，但由于电容充放电时间之间的关系不是绝对线性的，存在非线性现象，从而限制了测量范围。全数字 TDC 的特点是电路结构已经完全采用数字电路，时间间隔直接转换为数字码输出，抗噪声能力较强，体积小易于片上集成[9-10]。本文设计了一个两段式 TDC 计数结构来进行 ToF 的测量，为了实现千米级的测量范围，粗计数部分采用 10 bit 计数器，分辨率由计数器的时钟频率决定；精计数部分采用全数字结构的延时链 TDC 来优化分辨率。ToF 电路时序图如图 8 所示，当激光发出时 Start 信号时，粗计数部分的计数器开始计时，回波信号激发 APD 产生电流，通过像元信号链产生到达时刻信号 DET，到达时刻信号通过组合逻辑电路生成 Stop 信号，Stop 信号使粗计数 TDC 停止计数的同时作为使能信号使延时链 TDC 开始计数，直到下一个时钟脉冲上升沿到来时，延时链 TDC 停止计数，输出一串 32 位温度计码(5 位 TDC)。当 Stop 信号到达时寄存器中存储的计数值为 N，但此时并没有达到完整的第 N 个周期，所以粗计数的结果为：

$$T_{\text{coarse}}=(N-1)T \tag{12}$$

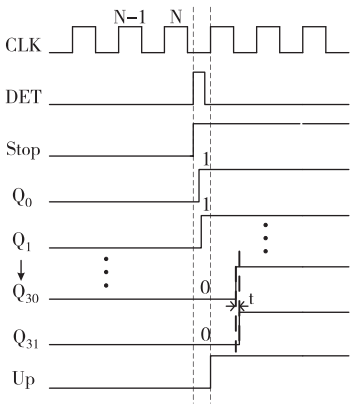


图 8　ToF 电路时序图

图 9 所示，通过所设计的余量提取模块将未到达一个粗计数周期的时间余量提取出来，生成精计数 TDC 的起止信号 Stop，Up。

精计数部分如图 10 所示，每个延时单元的延时为 t，对 Stop 信号经过的延时单元进行计数，在后一个时钟上升沿到来之前，Stop 每流经一个延时单元触发器就翻转为一个高电平信号，在时钟上升沿到来之后，触发器均不发生翻转，最终输出一组前 1 后 0 的温度计码，精计数即为单个延时单元与输出为 1 的个数 M 的乘积，时间分辨率为单级延时单元的延时 t。最终 ToF 的测量结果为：

$$T_{\text{total}}=(N-1)T+(T-Mt) \tag{13}$$

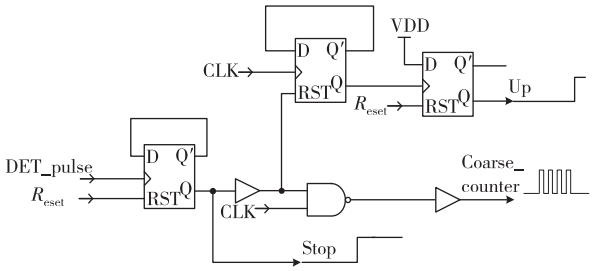


图 9　余量提取电路

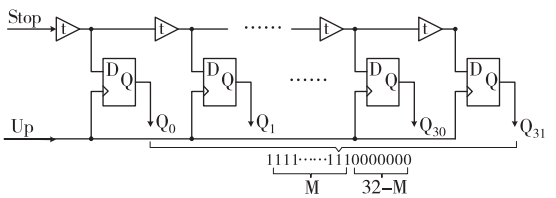


图 10　精计数延时链 TDC 结构

3　电路结果分析

采用标准 CSMC 0.18 1P6M 工艺进行电路的搭建和版图的绘制，基于 Cadence Virtuoso 工具实现，图 11 和图 12 分别为像元版图和芯片全版图。

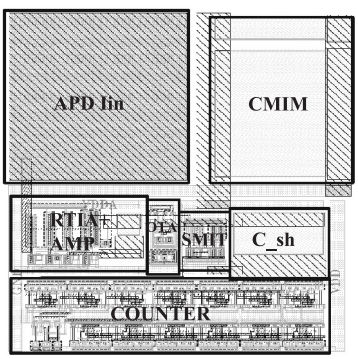


图 11　像元版图

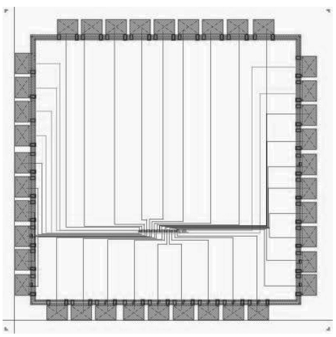


图 12　芯片全版图

在像元内部布局中，对于控制所有像元的复位信号和 Stop 信号都采用了“工”字形时钟树网络布

线，保证了数字信号时序的一致性，减小了像素之间的相对误差。CMIM 为耦合电容，其上下极板分别由 M5 和 M6 金属层构成且分别连在电源和地上，在版图中的主要作用是增强版图的匹配性，使布局更加对称合理，还可以减少电源与地之间的串扰。

芯片全版图面积为 3 mm×3 mm，阵列规模为 16×1，像元中心距为 50 μm，在模拟 3.3 V 和数字 1.8 V 电源下电路总功耗小于 58 mW。

3.1 电路仿真结果

APD 模型的电阻为 1 GΩ，电容为 0.5 pF，输入为 2 ns 脉冲宽度，1 μA 大小的模拟探测器电流，RTIA 输出结果如表 1 所示。*Gain* 代表 RTIA 的跨阻增益，*Res* 代表亚阈值 MOS 等效电阻，*TTP* 为输出电压到达峰值的时间，*BW* 为 −3 dB 带宽。有源电阻所加偏压增大，亚阈值 MOS 管等效电阻增大，跨阻增益随之升高，增益动态范围为 108～140 dB，在 108～120 dB 增益范围下，带宽最小为 302 MHz，满足主动探测模式下对带宽和转换速度的要求。

表 1 RTIA 输出结果

V_{bias}/mV	RTIA Output			
	Gain/dB	*Res*/kΩ	*TTP*/ns	*BW*/MHz
280	108.9	279	1.28	632
300	112.7	398	1.41	520
340	121.3	1 161	1.66	302
380	131.7	3 846	1.91	133
400	138.5	8 414	2.12	68

为了验证电路在不同工作场景下的应用效果和 ToF 电路的精度，对两种工作模式分别进行仿真。当电路工作在被动热成像模式下，取前三列像元电路，将输入电流范围设为 500～800 nA，步长为 100 nA，在列选电路的控制下按列依次输出，输出结果如图 13 所示，每个像元电路输出电压差值分别为 23.5，23.1，22.6 mV，验证了像元电路在被动模式下可均匀地转化输入光电流，具有良好的光强分辨率。当电路工作在主动探测模式下，输入为 2 ns 脉冲宽度，1 μA 模拟探测电流，如图 14 所示分别为放大器模拟输出、比较器输出、数字缓冲器输出，输出数字脉冲宽度为 3 ns 左右，从探测器接收到光电流到脉冲信号的输出的时间延迟小于 2 ns，在 108～120 dB 增益范围内输出抖动小于 150 ps。

像元输出的数字脉冲信号和同步激光发出的 Start 信号被送入 ToF 电路，为验证 ToF 电路的精度，设置输入电流的时刻为 6 326 ns，如图 15 所示为 ToF 量化结果，粗计数分辨率为时钟周期 10 ns，精计数分辨率为一个延时单元的延时355ps，经计算电路

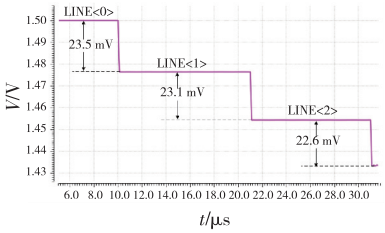


图 13 被动模式输出端结果

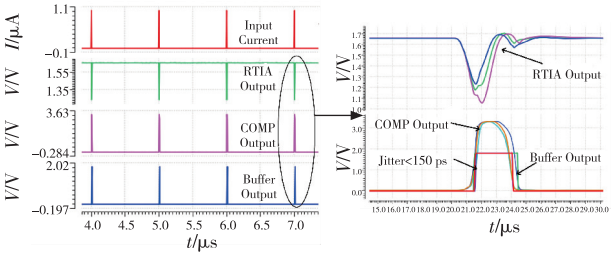
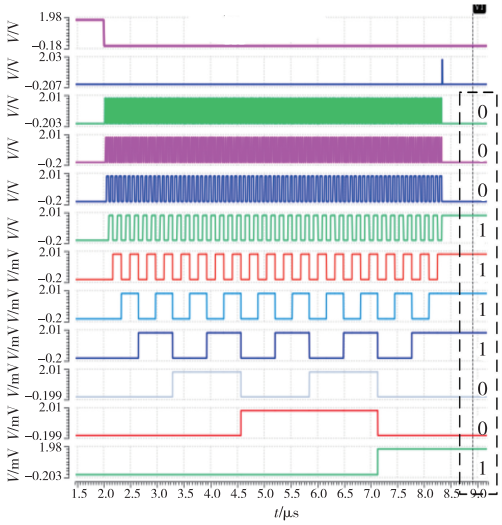
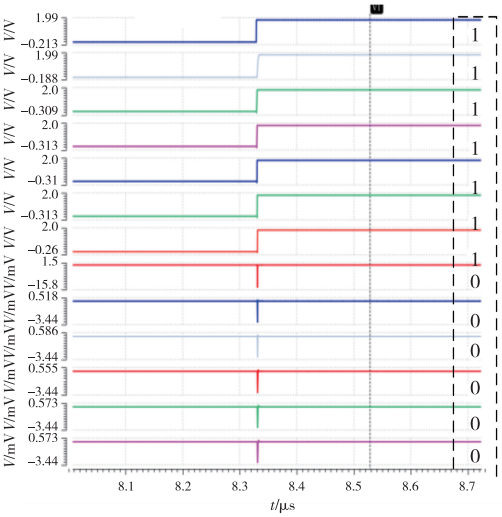


图 14 主动模式输出端结果



(a) 粗计数 TDC 计数结果



(b) 精计数 TDC 计数结果

图 15 两级 TDC 输出结果

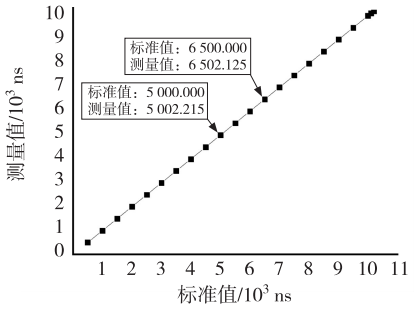


图 16　ToF 测量结果与标准值对比

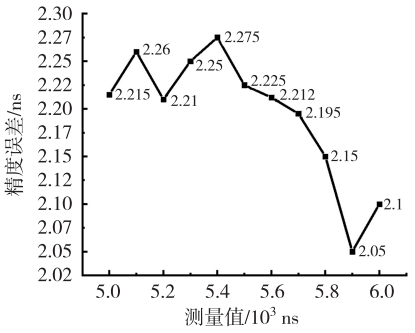


图 17　一个粗计数周期内精度误差

输出结果为 6 328.225 ns。对电路进行 0～10.2 全范围仿真，测距结果与标准值比较如图 16 和 17 所示，标准值为仿真测试中所设定的标准时间间隔，测量值为 ToF 电路仿真结果所显示的结果。在一个粗计数子周期内，误差最大值为 2.275 ns，最小值为 2.05 ns，最大误差与最小误差相差仅为 0.225 ns。经线性拟合分析，ToF 测量结果的线性度达到 99.99%。

3.2　误差因素分析

影响 ToF 精确度的非理想因素主要有以下几点：(1)像元内模拟信号链路的延时。从 APD 接收到回波信号开始到比较器输出到达时刻信号结束，这期间的 *I*-*V* 转换时间和比较器的翻转时间是带来延时的主要因素。扫描 280～340 mV 有源电阻栅压范围，得到数字输出延时为 1.68～1.8 ns。这一误差对面阵中所有像元带来的 ToF 偏移量近乎相同，可视为固定误差。(2)触发器的建立时间与传输电路延时。为了实现余量提取和多位计数，在 TDC 模块中使用了大量的组合逻辑和触发器。D 触发器的正常工作需要一定的建立时间，这会对 ToF 精度产生较小影响。仿真时固定时钟频率，改变 D 端输入信号的延迟时间，得到 D 触发器的建立时间在 120 ps 左右。

在后续数据处理中可将模拟电路带来的固定误差作为矫正量进行做减处理，D 触发器带来的微小误差可通过算法进一步优化。

表 2 给出了读出电路的主要参数及性能的仿真结果。

表 2　读出电路性能参数

参数	数值
温度/K	77
阵列规模	16×1
像元面积/μm^2	50
跨阻动态范围/dB	108～140
ToF 动态范围/μs	10.2
时间分辨率/ps	355
功耗/mW	0～58

4　小结

本文分析了线性 HgCdTe APD 的特点，结合其优势设计了一款基于线性工作模式下 HgCdTe APD 的高速成像电路。该电路采用增益可调的 RTIA 作为输入级，消除了积分时间和复位时间的限制，将光电流脉冲实时且高速地转换为连续模拟信号，再经过比较器和缓冲电路的处理产生到达时刻数字信号。ToF 电路包括两个阶段的测距过程，粗计数 TDC 量化位数为 10 位，量化精度位 10 ns，精计数 TDC 量化位数为 5 位，量化精度为 355 ps。采用 CSMC 标准 0.18 μm 1P6M 工艺进行电路设计与仿真，结果表明在 100 MHz 的时钟频率下，成像电路输出结果线性度达到了 99.99%，在 1 530 m 的测距范围内达到 106.5 cm 的精度。本文提出的将 RTIA 输入级像元电路和全数字 ToF 电路相结合进行远距离测距的方案，不受积分时间和复位时间的影响，使电路的速度和抗干扰能力有了较大的改善。两段式 TDC 兼顾测量范围和测量精度，后续可通过拓展计数器的位数拓展测量范围，减小延时单元的延时提高测量精度。该电路适用于红外模式低背景全局监控、激光模式局部重点观察和激光测距三维成像，在飞行时间脉冲激光雷达领域有较大的发展潜力。

参考文献：

[1]　丁瑞军，杨建荣，何　力，等. 碲镉汞红外焦平面器件技术进展[J]. 红外与激光工程，2020，49(1)：93-99.
Ding Ruijun，Yang Jianrong，He Li，et al. Development of technologies for HgCdTe IRFPA[J]. Infrared and Laser Engineering，2020，49(1)：93-99.

[2]　Beck J，Welch T，Mitra P，et al. A highly sensitive multi-element HgCdTe e-APD detector for IPDA lidar applications[J]. J. Electron. Mater.，2014，3(43)：2970-2977.

[3] Jeff Beck, Milton Woodall. Gated IR imaging with 128×128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA[J]. J. Electron. Mater., 2008, 37(9): 3622-3629.

[4] Sun X L, Cremons D R, Mazarico E, et al. Small all-range lidar for asteroid and comet core missions[J]. Sensors, 2021, 21(9): 3081-3090.

[5] Jeffrey D. Beck, Richard Scritchfield. Linear mode photo counting with the noiseless gain HgCdTe e-APD[J]. Proc. SPIE, 2011, 43(23): 8033.

[6] 胡 滨, 李 威, 李 平, 等. 有源电阻 RTIA 红外焦平面读出电路[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2008-2011.
Hu Bin, Li Wei, Li Ping, et al. RTIA readout circuit for infrared focal plane array using active resistor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2008-2011.

[7] 赵日新, 刘兴辉, 赵宏亮, 等. 一种带有自适应增益控制的激光雷达模拟前端[J]. 微电子学, 2021, 51(5): 641-646.
Zhao Rixin, Liu Xinghui, Zhao Hongliang, et al. A LIDAR analog front end with adaptive gain control circuit [J]. Microelectronics, 2021, 51(5): 641-646.

[8] Lu Z, Yeo K S, Lim W M, et al. Design of a CMOS broadband transimpedance amplifier with active feedback[J]. IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Systems, 2010, 18(3): 461-472.

[9] 罗 敏, 宫月红, 喻明艳. 时间-数字转换器研究综述[J]. 微电子学, 2014, 44(3): 372-376.
Luo Min, Gong Yuehong, Yu Mingyan. Research summary of time-to-digital converter[J]. Microelectronics, 2014, 44(3): 372-376.

[10] 霍玉晶, 陈千颂, 潘志文. 脉冲激光雷达的时间间隔测量综述[J]. 激光与红外, 2001, 31(3): 136-139.
Huo Yujing, Chen Qiansong, Pan Zhiwen. Review on time-of-flight measurement of pulsed laser radar[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(3): 136-139.

作者简介:

孙 铎(1998—),女,黑龙江省绥化市人,硕士研究生,主要研究方向为红外焦平面读出电路的设计和研究;

丁瑞军(1964—),男,浙江省嵊州市人,研究员,博士生导师,主要从事集成电路设计、红外光电器件及物理、分析和评价技术等方面的研究。