

采用 APD 单光子阵列读出集成电路的红外测距技术

吴金¹, 俞向荣², 史书芳², 郑丽霞¹, 孙伟锋²

(1. 东南大学 无锡分校, 江苏 无锡 214135; 2. 东南大学 微电子学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 红外单光子探测因其超高的检测灵敏度和信噪比, 有效提升了弱光检测系统的性能水平。基于 TSMC 0.35 μm CMOS 工艺, 提出了一种阵列型数字式红外读出电路及其应用系统的设计方法。采用由 OSC 多相时钟构成的低段全局共享 TDC 和高段像素独享 TDC 的两段式阵列结构, 在 170 MHz 时钟频率下, 实测获得了小于 1 ns 的时间分辨率和 3 μs 的量程, 并在 1 kHz 的帧率下采用串行模式输出数据, 经相关数据处理, 最终实现测距轮廓成像的功能。

关键词: 读出集成电路; 接口; 时间数字转换器; 光子; 雪崩光电二极管

中图分类号: TP11; TP13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0604002

Infrared ranging technology by using single photon APD array readout integrated circuit

Wu Jin¹, Yu Xiangrong², Shi Shufang², Zheng Lixia¹, Sun Weifeng²

(1. Wuxi Branch, Southeast University, Wuxi 214135, China;

2. Institute of Microelectronics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A infrared single-photon detecting system has greatly improved the performance of the weak light detection system due to its ultra high sensitivity and SNR. Based on TSMC 0.35 μm CMOS process, a design method for digital mode infrared ROIC and its application system were proposed. The system included high-segment pixel TDC and low-segment global shared TDC controlled by OSC multiphase clocks. The implemented circuit was operated at frame rates of 1 kHz with data output in a series mode, also it has a time resolution of less than 1ns along with a 3 μs measurement range under 170 MHz reference frequency condition, which can finally satisfy the application of ranging and imaging after relevant data processing.

Key words: readout integrated circuit; interface; time-to-digital converter; photon; avalanche photo diode

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-10

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012559)

作者简介: 吴金(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事集成电路设计, 红外传感信号检测方面的研究。Email: jwu@seu.edu.cn

0 引言

自 19 世纪 20、30 年代光电倍增管 PMT(Photo Multiplier Tube)首次实现微弱光信号探测以来,弱光探测始终都是科学界研究的热点领域之一,对其中核心的探测器的研究不断拓展并深入。19 世纪 80 年代前后,出现了利用外光电效应和二次电子发射效应的光电倍增管探测器,通过提高器件的内部增益,检测灵敏度和响应速度得到不断提升^[1]。近年来,雪崩光电二极管 APD(Avalanche Photo Diode)固态光电传感器因其高稳定性、高量子效率、高信噪比、低功耗等特性^[2],在激光测距、航空航天、生物医学和国防研究等领域获得了广泛的应用^[3],并有效推动了基于单光子飞行时间 TOF(Time of Flight)探测的 3D 成像和激光雷达的发展^[4]。

目前,国外在阵列 APD 单光子成像技术的研究领域处于领先地位,而国内对该领域的研究则刚刚起步,为突破西方国家设置的技术壁垒,目前国内众多研究机构对单光子探测成像技术的研究不断深入,取得了明显的进展^[5]。文中基于光子计时测距和 APD 传感器检测原理,根据实际系统的功能与性能需求,对整个 ROIC 系统架构、工作模式、控制方式、关键电路结构完成规划设计和实验验证。

1 TOF 计时测距原理

1.1 APD 阵列激光测距成像原理

根据 TOF 测距原理^[6],被测目标的探测距离为 $L=0.5c \times \text{TOF}$, c 是光子在大气介质中的传播速度,约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。显然,TOF 光子飞行时间与空间距离一一对应,阵列中各像素单元检测到的 TOF 时间差,可转换为被测对象空间位置的距离差,再通过对此类数据的相关处理,实现被测物体的轮廓成像。

完整的激光测距成像系统如图 1 所示,主机/延时器发出 Start 指令,使 APD 探测器处于待测状态,同时控制激光器发射红外激光脉冲,并触发 TDC 开始工作。经过一段时间后,反射信号通过光学系统汇聚入射到探测器的光电感应区,产生表征光子到达时刻的 Stop 信号,该信号与 Start 信号配合即可定义反射到特定像素的 TOF 的测量值,即被测目标距离。将各二维像素存储的 TOF 数据传递给 PC/上位机进行高速数据/图像处理,采用门控方式进行多帧

连续扫描,后续高速图像/数据处理单元可对多帧数据进行处理,最终完成二维图形的重建。

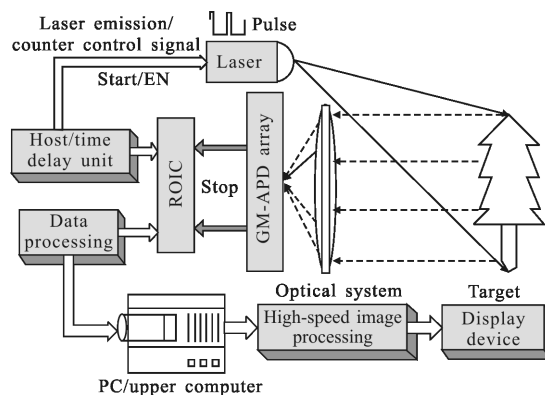


图 1 激光测距成像系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser ranging and imaging system

1.2 系统工作模式

工作模式与系统架构紧密配合可充分节省硬件资源并使系统发挥出最佳性能,ROIC 系统分为主动与被动两种工作模式。主动模式由 ROIC 负责整机的各项控制与调度,因 ROIC 存在延迟,会给各信号通道带来固有的延迟失配,使系统探测的偏差难以控制。被动模式则由 PC 承担整机中各模块的通信及交互配合。该模式下,主机将请求检测的指令发送给延时器,延时器接收到系统指令后延迟一段时间(可调),然后通过不同的通道将控制信号转发给各自的被控对象,由于各通道延迟时间可精确设定,则经过补偿配置可使各被控对象近似同一时刻启动,补偿了主机与 ROIC 之间的固有延迟失配,改善了系统的探测精度。文中选择的正是图 1 所示的被动模式系统架构,DG645 皮秒级数字延时器用于系统时序关系的精密控制。

1.3 单光子 APD 探测模式

单光子探测系统的核心是 APD 探测器及其对应的 ROIC 读出电路。APD 探测器用于感应光子信号并完成光电信号的转换,读出电路则完成对感应信号的数据处理,包括 I-V 转换,信号放大,数据量化和数据传输。

APD 反向电流与反向偏压之间的关系如图 2 所示,随着反向偏压的增大,反向电流随之增加。APD 有两种工作模式,当反向偏压低于雪崩电压时,APD 的输出电流与输入光强成正比,称为线性模式(Linear mode),此时其光电流增益处于 $10 \sim 10^3$ 的较

低水平;当反向偏压超过雪崩电压时,发生雪崩倍增效应,单光子激发即可使 APD 的输出电流快速达到峰值,称为盖革模式(Geiger mode),其光电流增益可达到 10^6 以上,输出的光电流可达数百微安甚至毫安量级,检测容易。

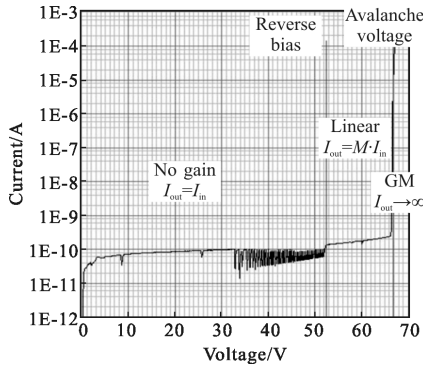


图 2 InGaAs APD 反向输出电流与反向偏压关系的测量结果
Fig.2 Measured result of InGaAs APD between output current and reversed biasing voltage

雪崩电流无法自然淬灭,因此探测器不能长时间置于高反向偏压的待测模式,需采用门控工作方式以及主动淬灭的动态偏置结构来确保 APD 完成多次检测。门控模式定义了感应光信号的最大时间窗口,限制了测试量程,从而抑制暗计数噪声的影响,进而增加了 SPAD 工作的稳定性^[7]。淬灭电路用来切换 SPAD 的反偏电压,使其分别工作在待测和截止模式下,实现门控内可靠的单光子检测。

2 阵列 ROIC 架构与关键电路设计

接口电路完成信号感应并产生待测时间,TDC 则完成对待测时间的量化,两者共同决定了 ROIC 系统的精度和性能。基于各像素 APD 检测的需要,GM-APD 阵列 ROIC 中各像素独享是必然的,因此 ROIC 系统阵列架构,主要由阵列 TDC 决定。对于多比特高分辨率 TDC,单段式 TDC 因过高的功耗或过大的面积而无法达到要求,通常选择分段式 TDC 架构。

2.1 读出电路系统阵列架构

根据 TDC 的分段形式及物理位置分布特征,目前 ROIC 系统架构分为以下三种:

(一) 将高段和低段 TDC 全部置于像素内部的全内置型系统架构,各像素单独计数,由于每个像素都需要一个完整的 TDC,占用面积较大,信号引线较多,功耗也偏大。受像素面积的制约,该结构低段 TDC 被限定在 2 bit 以内。

(二) 将高段和低段 TDC 全部置于像素外的全外置型系统架构,计数器为阵列中各像素所共享,同时像素中仍保留寄存器阵列以锁存 TDC 数据。此架构中,传输线多且连接复杂,占用面积大,像素阵列扩展性较弱^[8],适合于小阵列系统。

(三) 如图 3 所示,将高段 LFSR 伪随机数 TDC 置于像素内部的低段 TDC 共享型架构,各像素独享高段 TDC,完成粗计数;低段细分 TDC 置于像素外部,全局共享,同时所有像素共享驱动低段 TDC

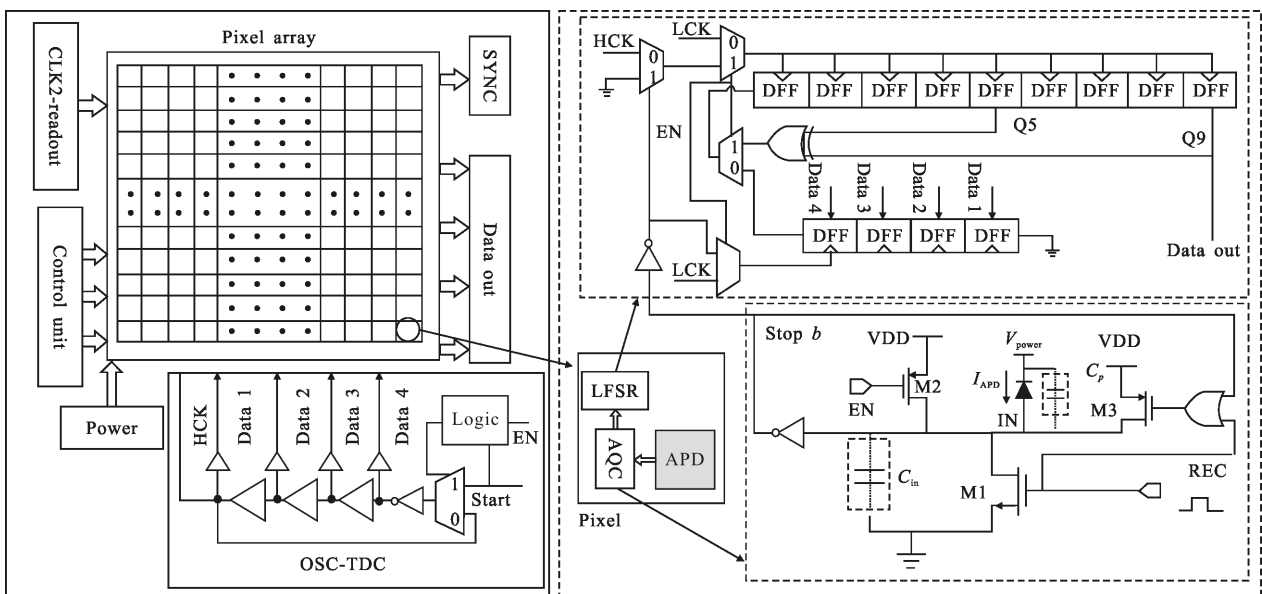


图 3 低段 TDC 共享型 ROIC 系统框图

Fig.3 Diagram of ROIC based on low segment shared TDC

的环振时钟。此架构有利于减小像素面积、降低系统功耗，缩减大量需要通过全局时钟树传输的数据信号，减小了信号干扰来源，同时拓展了低段 TDC 的位数，有利于提高精度。文中采用低段共享型结构，为了消除在高频编码过程中因延迟失配带来的误差，对低段位的四位数据直接锁存，和高段位数据均在传输输出后完成编码，其代价是低段需多锁存一位数据。

2.2 关键电路设计

ROIC 系统主要由像素单元、环振时钟、控制、数据读出以及电源等模块构成。

像素单元中 AQC(Active Quenching Circuit)作为光子感应检测电路，采用电容感应主动淬灭控制方式，以提高响应速度。在外部 REC 窄脉冲复位信号和有效 EN 门控信号共同作用下，可将 IN 点电位下拉至低电位，进入待测模式。当 APD 感应到反射的光子后产生雪崩电流，并经寄生电容 C_{in} 转换为脉冲电压，经 INV 阈值比较，输出表示光子到达的 Stop 高电平信号并主动将 M3 导通，快速淬灭雪崩电流，使 APD 进入截止模式，等待下一个门控周期重复光子检测过程。门控信号帧频为 1kHz，EN 高电平时感应的数据在 EN 低电平时输出。

四级压控环振包含三个同相延迟单元，以及由二选一开关和反相器构成的反相复合延迟单元，各级延迟匹配时，实现均匀分相。引入二选一开关在 EN 控制下启动或关断环振，实现各信号的初相同步，消除相位误差，抑制功耗。环振内部四节点对应八个时钟相位，根据 Stop 信号处于的具体相位状态区间，经编码可实现对计数周期的 T/8 细分。各像素产生的 Stop 信号所对应的细分 TDC 数据，在时序逻辑控制下即刻传输到对应的像素单元中锁存。环振输出端作为高段 9 bit LFSR 的时钟信号，驱动高段 TDC 计数，在 Stop 达到后停止计数并锁存数据，系统的量程为 $2^9 \times T$ 。采用 DFF 链经 XOR 反馈构成的 LFSR 可实现伪随机计数功能，在 Stop 到达后锁存该计数值。在 MUX 开关控制下可将 LFSR 环路断开即配置为数据串行输出模式，完整的像素量化数据包括锁存的粗计数值和存储的细分分辨值，可逐像素串行输出。

采用减小各种寄生效应，提高成品率和抗噪声干扰能力全定制版图设计方法。ROIC 32×32 系统版图如图 4 所示，芯片面积为 4.5 mm×4.5 mm。由于数

字电路占主要部分，版图设计主要考虑金属线 AC 和 DC 的电流承载能力，以及对瞬态大电流的防护，抑制金属线寄生电阻造成的电压跌落。

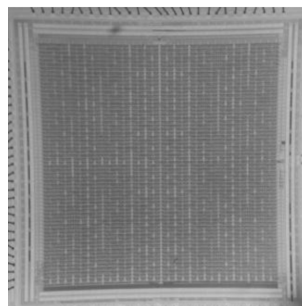


图 4 GM 32×32 ROIC 芯片显微照片
Fig.4 Micrograph of GM 32×32 ROIC

3 测试验证

测试模式下，由于 ROIC 未与 APD 阵列混合封装，因此采用 FPGA 产生 Stop 信号模拟光子产生的触发信号，系统测试平台如图 5 所示。

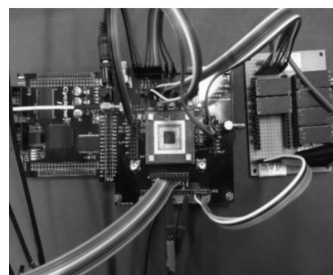


图 5 ROIC 测试平台
Fig.5 Test platform of ROIC

环振测试结果显示，随着环振电压的降低，时钟频率变大，与理论相符。图 6 为示波器实测的振荡器输出波形图，受示波器带宽和电缆线寄生电容的影响，观察到的时钟波形存在明显失真，偏离方波时钟波形，但其基带频率信息仍可保留并经测试获得，在 3.3 V 电源电压下，测得环振频率的平均值约为 170 MHz。

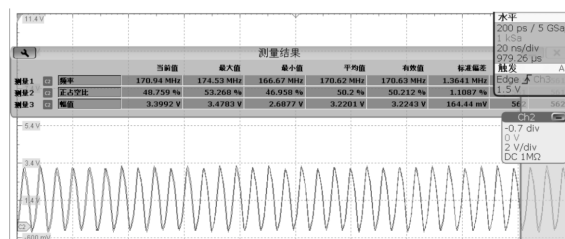


图 6 振荡器波形图
Fig.6 OSC waveform figure

ROIC 系统测试结果显示,各端口输出数据稳定,具有较好的一致性。为方便在不外加传感器的情况下测试 TDC 计数性能,对第一行的第 3、4、5、6 共 4 个像素(从左到右)做额外处理,使这 4 个像素的 Stop 信号由外部提供且共用。设置被测时间,即 EN-Stop 时间间隔为 74 ns,此时示波器读数如图 7 所示,CELL 3~6 对应的读数均为 110000 100 0000,译码后的值分别为 12 和 4,在 170 MHz 计数时钟频率下,即周期为 5.88 ns,根据测量时间的计算公式:测试时间=(高段 LFSR 计数值+低段 TDC 计数值/8)×高频时钟周期,可计数出实际的测量时间为 73.5 ns,因此测量时间的绝对误差为 0.5 ns。

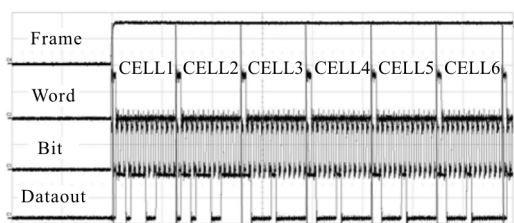


图 7 测试像素输出数据

Fig.7 Output data of the tested pixel

固定 EN 脉宽,将 STOP 按照 1 ns 步进来设置 EN-Stop 时间间隔,进行计数以测试系统的分辨率。通过 MATLAB 处理,生成的输入输出曲线如图 8 所示。图中横坐标为按照 1 ns 步进的 1 000 个测试点,纵坐标为对应的测量值。从数据图中看出是一条稳定的直线,线性度与理想 1 的偏差仅为 0.5%,对于系统 1 ns 分辨率的设计指标符合较好。

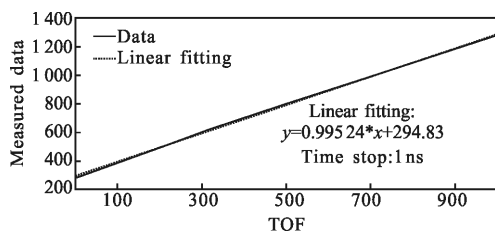


图 8 分辨率测试图像

Fig.8 Image of test resolution

从宽测量时间范围来看,系统的测试量程可以达到 3 μs。微分非线性(DNL)为实际分辨率与理想分辨率之间的相对误差。积分非线性(INL)为输出值偏离线性的最大距离,反应的是实际分辨率相对于理论分辨率的相对误差积累量^[9]。消除个别段间误码等

明显出错的数据,测试结果表明 ROIC 32×32 系统的 DNL 为-0.73~+0.49LSB,INL 为-2.10~+0.53LSB。

对 GM 32×32 APD 阵列 ROIC 系统进行测试时出现一定概率的误码,即在大阵列应用条件下,寄生效应会使时间测试量程和量化分辨率出现明显退化。数据的误码有两种不同性质的来源。由触发器固有的建立保持时间引入的错误采样为数据锁存误码,实际应用中非理想触发器无法完全消除此类误码,只能通过减小建立保持时间以及降低采样频率对其加以抑制。在对多相时钟各状态节点的编码过程中,扇入数量不同、输出逻辑路径不匹配以及节点负载差异等因素,导致相对延迟偏差并改变数据之间正常的相位关系,由此引入延迟失配误码^[10],降低或消除此类误码率依赖于电路延迟匹配性能的改善。

将 ROIC 和 32×32 阵列 APD 混合封装之后,进行外场测试,经过上位机相关算法处理后,实现了 800 m 远处被测建筑物体的轮廓成像功能,成像结果如图 9 所示。

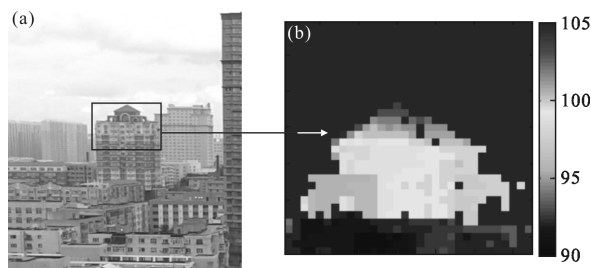


图 9 800 m 左右目标的轮廓成像结果

Fig.9 Contour imaging results of 800 m target

4 结论

基于 GM InGaAs-APD 传感器,总结了帧频式 32×32 以上阵列规模读出电路的架构设计和应用方法,通过 TSMC 0.35 μm CMOS 工艺流片,读出电路工作电压 3.3 V,接口工作电压 5 V。芯片测试结果证明,该电路具有稳定的低于 1 ns 的时间分辨率,且具有较好的线性度和稳定性,可用于军用及民用红外雷达测距成像系统。

参考文献:

[1] Wang Feng, Sun Kaijiang, Xiang Xiaomei. Research of automatic gain control technology based on photo multipliers [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(4): 510-514. (in Chinese)

- [2] Huang Zhen, Jiang Yuanda, Sun Zhibin, et al. Near infrared readout circuit of single photon diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 464–468. (in Chinese)
- [3] Liu Xiaoyan, Wang Mingjia, Guo Fangmin. Test study on weak-lightlevel response for new quantum effect photo-detector array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2546–2552. (in Chinese)
- [4] Zheng Ruitong, Wu Guanghao. Pulsed one-dimensional cannerless LiDAR system based on linear APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 96–100. (in Chinese)
- [5] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsen, et al. Target-distance and intensity information detecting with high precision in laser imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2668–2672. (in Chinese)
- [6] He Weiji, Sima Boyu, Miao Zhuang, et al. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2488–2494. (in Chinese)
- [7] Zheng Lixia, Wu Jin, Zhang Xiuchuang, et al. Sensing detectionand quenching method for InGaAs single-photon detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 218–226.(in Chinese)
- [8] Bronzi D, Villa F, Bellisai S, et al. Large-area CMOS SPADs with very low dark counting rate [J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8631(12): 5644–5653.
- [9] Gao Lei, Zhai Yongcheng, Liang Qinghua, et al. IRFPA ROIC integrated digital output [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1686–1691. (in Chinese)
- [10] Prucnal P R. Applications of wavelength-an-in for high performance distributed processing systems [C]// IEEE International Symposium on Nanoscale Ar chitectures, 2014: 177–178.