光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.005

三维成像用128×2线性模式APD焦平面探测器设计

邓光平*，马华平，鹿婷婷，黄　建，王　颖
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 设计了一种用于激光三维成像的128×2线性模式APD焦平面探测器，器件包括硅基APD焦平面阵列和读出电路。硅基APD焦平面阵列采用拉通型n^+-p-π-p^+结构，像元中心距为150 μm，工作在线性倍增模式。读出电路采用单片集成技术，将前置放大电路、TDC计时电路和ADC等功能模块集成在单一硅片上。整个线性模式APD焦平面探测器可实现128×2阵列规模的激光信号并行检测，并采用LVDS串口输出激光脉冲信号的飞行时间信息和峰值强度信息。测试结果显示，该线性模式APD三维成像探测器可同时获取时间信息和强度信息，成像功能正常。

关键词： 雪崩光电二极管；读出电路；焦平面阵列；三维成像；激光雷达
中图分类号： TN312.7　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0784－04

A Design of 128×2 Linear Mode APD Detector for 3D Imaging

DENG Guangping, MA Huaping, LU Tingting, HUANG Jian, WANG Ying
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: A kind of 128×2 linear mode APD focal plane detector used for 3D imaging is designed, including Si-based APD focal plane array (FPA) and read-out circuit. The APD FPA with the structure of punch through n^+-p-π-p^+ works at the linear multiply mode, and the pixel pitch is 150 μm. The readout integrated circuit (ROIC) integrates the pre-amplifier, TDC, ADC and other function circuits on a single chip. The linear mode APD detector can simultaneously detect the laser pulse of 128×2 imaging array, then output the flight time and the amplitude of the laser pulse by using the LVDS driver. The test results show that the linear 3D imaging detector can obtain necessary information properly, verifying its effectiveness in imaging.

Key words: avalanche photodiode; ROIC; focal plane array; 3D imaging; LIDAR

0　引言

激光成像雷达作为一种主动成像装置，具有测量精度高、探测距离远、抗干扰能力强以及系统易小型化等优点，在地形测绘、无人车辆自动驾驶、智能机器人等领域得到了广泛应用。激光成像雷达需要解决目标三维空间信息的采集、处理与分析等问题，涉及激光发射、激光探测、成像数据处理等关键技术[1]。目前，严重制约国内激光三维成像发展的关键因素是雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode，APD)阵列探测技术的不成熟。

APD是一种半导体光探测器，其利用高反向偏压下的电离碰撞效应，可获得系统内部电流增益。APD探测器的工作模式分为线性模式和盖革模式。当反向偏压低于雪崩击穿电压时，APD探测器对光生载流子进行线性倍增，反向偏压越大，倍增倍数越大，上述工作状态被称为线性模式[2]；当反向偏压高于雪崩击穿电压时，APD探测器对光生载流子的倍增倍数急剧增大，以至少数几个光生载流子便可倍增输出饱和电流，上述工作状态被称为盖革模式[3]。

盖革模式APD探测器具有单光子探测能力，在远距离、弱信号探测领域应用价值较大，但是其高

收稿日期：2020－08－19.
*通信作者：邓光平　E-mail：bardeen_deng@163.com

的背景噪声和暗计数噪声会使得探测系统出现较高的虚警率[4-5]。此外，根据光子的测不准关系，通过光子计数得到的光子数与实际到达探测器表面的光子数是不同的，因此盖革模式只能够探测信号有无，不能反映信号的强度信息[6]。线性模式 APD 探测器的信号倍增能力低于盖革模式 APD 探测器，但是其线性倍增关系使得系统既能够判断信号有无，又能够获取信号的强度信息[7]。因此，时间信息与强度信息的同时获取能力使得线性模式 APD 探测器更加适用于不同环境下对自动目标的识别与跟踪，成为三维激光成像雷达的首选[8-9]。

1　线性模式 APD 三维成像探测系统

线性模式 APD 三维成像探测系统主要由 905 nm 激光器、发射光学系统，扫描摆镜、接收光学系统、信号读出处理电路、控制及数据处理系统等构成，如图 1 所示。其三维扫描成像原理如下：集成的线列 905 nm 激光器发出的激光经过扩束系统后，照射到扫描摆镜上，扫描摆镜按一定规律旋转，再经扫描摆镜照射在目标物体上形成激光光斑，同时激光器发出的激光同步信号触发读出处理电路开始计时，线列激光光斑照射物体后经漫反射返回接收光学系统，照射到 128×2 APD 探测像元，产生光激发，经过信号放大、时刻鉴别、峰值保持等处理后产生时间信息和强度信息，获取的数据最后通过 LVDS 接口送给 FPGA 进行后期图像数据处理。

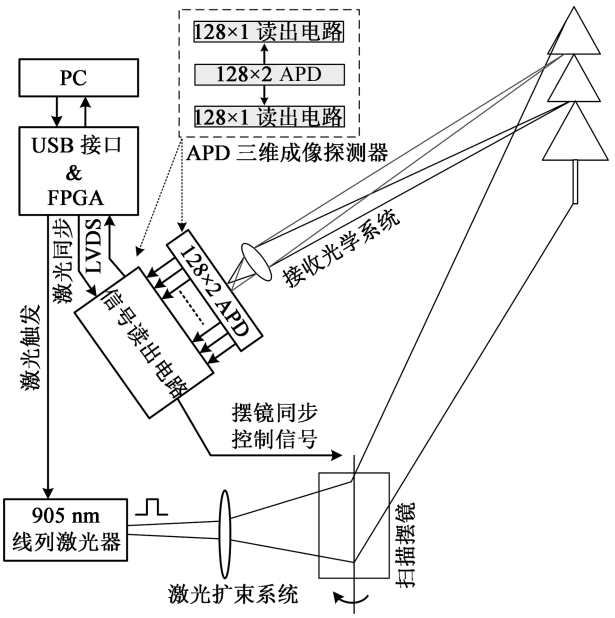
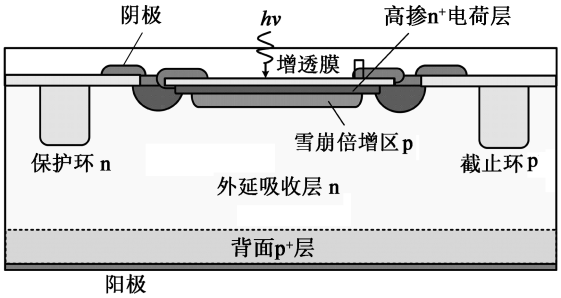


图 1　线性模式 APD 三维成像探测系统示意图

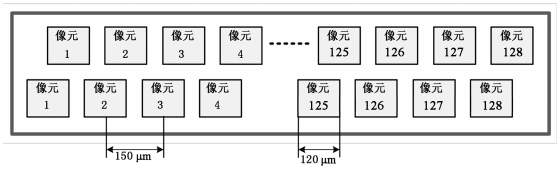
硅基 APD 焦平面阵列输出的电流信号采用双边同时读出方式，即单边读出电路的规模为 128×1，这样读出电路只在列方向有尺寸限制，每个像元级读出电路能够同时完成时间和强度信息采集。APD 焦平面阵列芯片与读出电路芯片均粘接在基板上，并采用引线互连，整体构成了三维成像用 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器。

2　硅基 APD 焦平面阵列设计

硅基 APD 焦平面的探测单元采用拉通型 n^+-p-π-p^+ 结构，其器件结构如图 2(a)所示，主要由光敏区(高掺 n^+ 层)、雪崩倍增区(p)、吸收层(π)、阳极接触层(p^+)、击穿保护环(n)、截止环(p)、增透膜等组成，相较于普通的 pn 型 APD，该结构具有击穿电压相对较小的优点。



(a)　探测单元结构



(b)　单元排布示意图

图 2　APD 焦平面阵列芯片的探测单元结构和单元排布示意图

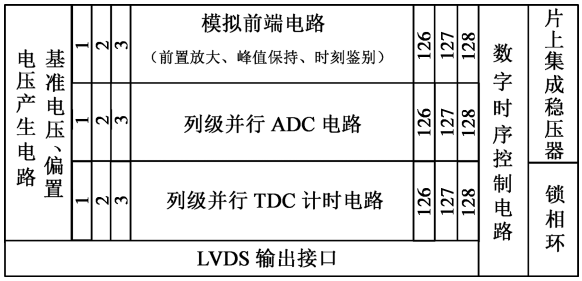
探测阵列采用 p 型高阻外延片制备。光敏区为高掺杂的 n^+ 层，采用离子注入的方式形成，主要为 APD 提供高内建电场。雪崩区为 p 层，通过高能离子注入的方式形成，主要为 APD 提供雪崩倍增效应。本征吸收层 π 区为低掺杂的高阻外延层，APD 工作时完全耗尽，主要起吸收光子作用。阳极接触层为高浓度 p^+ 衬底层，主要起减小阳极接触电阻的作用。保护环为具有特殊杂质分布的 n 型层，采用多次注入结合退火调控杂质分布的方式形成，其主要起防止器件边缘击穿的作用。截止环采用多次注入 p 型杂质结合退火调控杂质分布的方式形成，起到抑制像元串扰的作用。增透膜采用 SiO_2/Si_3N_4

复合介质，主要起减小入射光反射，提高器件量子效率的作用。

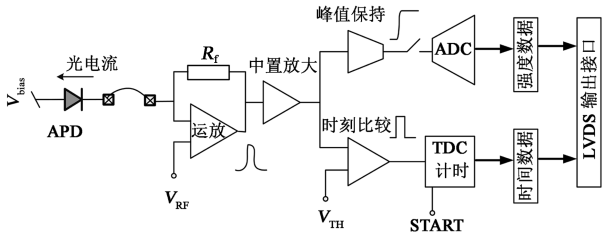
硅基 APD 焦平面阵列采用正照工作模式，单元排布采取交错排布方式，具体排布如图 2(b)所示。像元交错排布使 128×2 焦平面在实际使用中能够近似等效为 256 线，可有效提高线列 APD 焦平面传感器的空间分辨率。其中，APD 单元光敏面尺寸为 120 μm×120 μm，像元中心距为 150 μm。

3 单芯片读出电路设计

线性模式 APD 焦平面探测器的读出电路采用的是全并行处理架构，由 128 列宽带低噪声跨阻放大、峰值保持与时刻鉴别电路、128 列并行 ADC 电路、128 列并行时间数字转换电路(TDC)组成，如图 3(a)所示。外围电路采用多通道复用技术，电路模块为阵列共享，主要由基准电路、高速 LVDS 输出接口、数字时序控制电路、片上集成稳压器和锁相环电路等模块构成。



(a) 单芯片读出电路的芯片架构



(b) 单通道电路的结构原理图

图 3 单芯片读出电路的芯片架构和单通道电路的结构原理图

每个通道的电路结构如图 3(b)所示。反馈电阻 R_f 与运放构成了前端跨阻放大器，将脉冲电流信号转换为脉冲电压信号；中置放大器对前端跨阻放大器的模拟输出信号进行再放大，一方面满足实际应用中高增益的要求，另一方面增加信号驱动能力；时刻鉴别电路对放大后的脉冲信号进行检测，判定信号的起止时刻，然后将鉴别信号送入计时电路；当起始信号 START 到来时，TDC 计时电路开始计时，接收到时刻鉴别电路输出的停止信号后，计时结束；峰值保持电路用于获取脉冲峰值，保存的峰值信号被送入 ADC 电路转换为数字信号。经过 TDC 和 ADC 电路转换后的时间信息和强度信息采用 LVDS 的数据模式输出到芯片外。

在高行帧频使用条件下，数据转换与输出将采用卷帘方式，例如：在第 1 帧进行探测时，进行第 1 帧的 TDC 和 A/D 转换，输出数据无效；在第 2 帧进行探测时，TDC 和 A/D 转换，输出第 1 帧的时间和灰度数据；在第 3 帧进行探测时，TDC 和 A/D 转换，输出第 2 帧的时间和灰度数据。在低行帧频使用条件下，读出电路可在同一帧时间内完成探测、TDC 转换、ADC 转换以及数据输出。

4 样品测试及分析

线性模式 APD 焦平面探测器的探测阵列采用 0.5 μm 硅基光电探测器工艺进行设计和制作，而单芯片读出电路采用的是 0.11 μm CMOS 集成电路工艺。一个线性模式 APD 焦平面探测器包含一个硅基 APD 焦平面阵列和两个读出电路，如图 4 所示：读出电路放置在 APD 焦平面阵列的两侧，两者采用金丝进行互连，整个三维成像探测器采用 PCB 管壳进行封装。

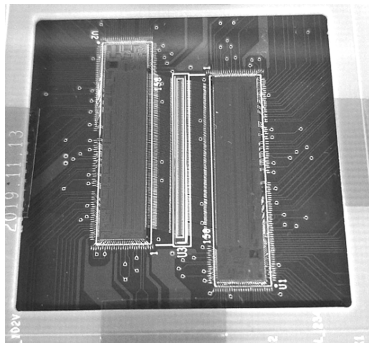


图 4 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器实物照片

为了准确地对硅基 APD 探测单元及信号处理电路进行性能评价，需要采用激光发射与对准测试系统。该系统能将光纤入射的激光聚焦到不大于 30 μm 的直径内，且能通过图像识别系统直观显示聚焦后的激光光斑的位置，使得发射的激光脉冲能够精准地落到每个 APD 探测单元的光敏面，此外，步进控制程序使得激光在测试完一个 APD 探测单元后自动位移到下一个 APD 探测单元。测试用激光的波长为 905 nm，发射频率与芯片的行帧频保持一致，为 200 kHz。由于数据传输速率高、传输数据

量大，采用了抗干扰能力强的差分传输模式，并采用工业级 Cameralink 接口进行数据采集，系统数据传输能力最高可达 5 G/s。

读出电路输出的强度信息为 12 位，时间信息为 16 位，200 kHz 行帧频条件下的最大时间量程为 2.8 μs，通过内部寄存器配置，在低行帧频条件下的最大时间量程可达到 16 μs。硅基 APD 焦平面探测阵列的偏压为－100 V，此时灵敏度为 50 A/W@905 nm。测试结果显示，线性模式 APD 三维成像探测器的非均匀性为 7%，串扰为 0.15%，强度噪声为 15.8 DN，时间分辨率为 0.25 ns。图 5 为单点激光照射到 APD 阵列光敏面的成像图，图中左边部分为强度信息输出（横向为 128×2 列 APD 探测单元输出，纵向为连续采集 512 帧），白色亮条线为被激光照射到的探测单元的输出信号，其他未被照射到的单元的输出数值为本底噪声，图像灰度信息显示为暗黑色。图中右边部分为时间信息输出（横向为 128×2 列 APD 探测单元输出，纵向为连续采集 512 帧），灰色线条为被照射到的单元的输出数值为 65535，图像距离信息显示为白色，表示没有在最大时间量程内探测到回波。



图 5　单点激光照射到 APD 阵列光敏面的成像图

5　结论

设计了一种 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器，器件包含硅基 APD 焦平面阵列和读出电路。APD 焦平面阵列采用两行同时读出模式，可实现 128×2 阵列规模的激光信号并行检测。APD 探测单元工作在线性模式，具有良好的线性倍增能力。读出电路的阵列规模为 128×1，采用单片集成模式，极大地降低了系统的设计复杂度和外形尺寸。测试结果显示，线性模式 APD 焦平面探测器的最大行帧频可达 200 kHz，最小时间分辨率可达 0.25 ns，可同时获取激光回波的飞行时间信息和峰值强度信息。该线性模式 APD 焦平面探测器的非均匀性为 7%，串扰为 0.15%，可确保良好的三维成像效果。

参考文献：

[1] 于　森. 激光扫描成像系统研究[D]. 北京：北京邮电大学，2014：1-15.
Yu Miao. Research on scanning imaging ladar system[D]. Beijing：Beijing University of Posts and Telecommunications，2014：1-15.

[2] Borniol E D，Rothman J，Guellec F，et al. Active three-dimensional and thermal imaging with a 30-μm pitch 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array[J]. Opt. Engin.，2012，51(6)：1-7.

[3] Zappa F，Tisa S，Tosi A，et al. Principles and features of single-photon avalanche diode arrays[J]. Sensors & Actuators A：Physical，2007，140(1)：103-112.

[4] Katz A，Shoham A，Vainstein C，et al. Passive CMOS single photon avalanche diode imager for a Gun Muzzle flash detection system[J]. IEEE Sensors J.，2019(14)：1-1.

[5] Kolb K E，Figer D F，Lee J，et al. Radiation tolerance of a Geiger-mode avalanche photodiode imaging array[J]. J. of Astronomical Telescopes Instruments & Systems，2016，2(3)：036001.

[6] Brian A. Geiger-mode avalanche photodiode arrays integrated to all-digital CMOS circuits[J]. Sensors，2016，16(4)：495.

[7] Beck J D，Scritchfield R，Mitra P，et al. Linear mode photon counting with the noiseless gain HgCdTe e-avalanche photodiode[J]. Opt. Engin.，2014，53(8)：1-10.

[8] Mcmanamon P F，Banks P，Beck J，et al. Comparison of flash lidar detector options[J]. Opt. Engin.，2017，56(3)：1-23.

[9] 李　骏，王健安，赖　凡. 毫米波片上雷达技术研究进展[J]. 微电子学，2019，49(4)：545-550.
Li Jun，Wang Jianan，Lai Fan. Research status of millimeter wave on-board radar technology[J]. Microelectronics，2019，49(4)：545-550.

作者简介：

邓光平（1985－），男，2011 年毕业于电子科技大学微电子技术专业，获硕士学位，高级工程师，主要从事光探测与成像读出电路设计。