光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250319001

应用于高精度三维成像的硅基线性APD焦平面组件设计

邓光平*，黄　建，鹿婷婷，阙筱雅，刘丰豪，马华平
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 设计了一种用于非扫描式激光三维成像的64×64硅基线性雪崩二极管（APD）焦平面阵列组件，包括硅基线性APD阵列和读出电路。阵列芯片采用背照式N^+-p-π-P^+结构，像元中心距为150 μm，工作在线性倍增模式。通过集成片上微透镜、反射镜和复合增透膜等结构，显著提升近红外波段的探测灵敏度。读出电路采用单片集成技术，在单一硅片上集成了高速前置放大、时刻鉴别、高精度时间间隔测量和时序控制等功能模块。该组件能够实现64×64阵列的全并行激光脉冲信号探测，具有良好的均匀性。测试结果表明：在905 nm波长下，组件的最小检测光功率为20 nW，时间分辨率为0.339 ns，计时位数为16 bits，最大帧频达到5 kHz。该组件满足了高精度、高速、远距离非扫描式激光三维成像的探测需求。

关键词： 线性模式雪崩二极管；读出电路；焦平面阵列；三维成像；时间分辨率
中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0456－08

Design of a Linear-Mode Si-APD Module for High Accuracy 3D Imaging

DENG Guangping, HUANG Jian, LU Tingting, QUE Xiaoya, LIU Fenghao, MA Huaping
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: A 64 × 64 silicon-based linear-mode avalanche photodiode (APD) module was designed and fabricated for three-dimensional (3D) laser imaging. The silicon-based APD focal plane array, with a back-illuminated N^+-p－π-P^+ structure and 150-μm pixel pitch, operates in the linear avalanche mode. The APD pixels use an on-chip microlens, a reflecting mirror, and a composite antireflective coating to improve the photon detection sensitivity in the NIR range. The constituent readout integrated circuit integrates a high-speed fronted amplifier, a time discrimination circuit, high-accuracy TDCs, a timing control module, and other functions on a single chip. The 64 × 64 silicon-based linear mode APD arrays can simultaneously detect laser pulses with good uniformity. Test results show that the threshold optical power detected at 905 nm is 20 nW; in addition, the time resolution, time range, and maximum frame rate are approximately 0.339 ns, 16 bits, and 5 kHz, respectively. This component meets the detection requirements for high-precision, high-speed, long-distance, non-scanning laser 3D imaging.

Key words: linear-mode avalanche photodiode; readout integrated circuit; focal plane array; 3D imaging; time resolution

0　前言

非扫描式的三维成像对高速运动目标具有较好的探测效果。目前主流的非扫描式三维成像方式包括双目立体相机和雪崩二极管（APD）激光焦平面两种。双目立体相机利用偏光技术将目标分

收稿日期：2025－03－19.
* 通信作者：邓光平

别送入两个相机来模拟人眼，并通过算法重构具有深度信息的三维图像，该技术可以采用市面通用相机进行构建，但是其算法复杂、计算密集，需要系统具备很高的计算处理能力[1]。APD激光焦平面利用激光飞行时间直接获取目标三维信息，具有灵敏度高、成像速率快、作用距离远以及易于集成等优点，被广泛用于地形测绘、目标跟踪和障碍规避等领域[2-3]。

APD激光焦平面按照APD探测器的倍增工作模式，可以分为线性APD焦平面和盖革APD焦平面两类。由于激光在大气传输过程中会受到大气吸收、散射等因素影响而发生衰减。在3 km以内的近程范围，激光回波功率较强，线性APD焦平面能够对其响应；在3～18 km远程范围，激光衰减严重，单像素获得的回波光子数从几千到几个不等，因此，盖革APD焦平面较为适合[4]。在抗环境光干扰、虚警率方面，线性APD焦平面要优于盖革APD焦平面。另外，由于盖革APD探测器需要进行淬灭-复位操作才能够重新具备光子探测能力，在时间维度上存在探测盲区，而线性APD焦平面则具备连续探测能力[5]。

美国Advanced Scientific Concepts公司在2004年成功研发了基于128×128规模APD焦平面的Flash激光雷达，其APD焦平面工作在线性模式，响应波长为1 570 nm，测距范围为3 km，测距精度为15 cm[6]。美国Raytheon公司在2011年研制出256×256规模线性APD焦平面，测距范围约为200 m，测距精度为5 cm，该款器件被用于NASA的ALHAT项目[7]。国内线性APD激光焦平面研制可见报道有：西南技术物理研究所于2018年研制出64×64规模InGaAs基线性模式APD焦平面，最小可检测回波功率为400 nW，时间分辨率为1 ns[8]；重庆光电技术研究所于2020年研制出了128×2规模的硅基线性模式APD焦平面，时间分辨率为0.25 ns[9]。

目前，主流的APD探测器制备材料主要包括Si，InGaAs和HgCdTe三类：硅基APD主要用于可见光和近红外波段，InGaAs基APD主要用于近红外和短波红外波段，HgCdTe基APD则用于短波和中波红外波段。硅材料的质量特性要优于化合物材料，内部缺陷较低，因此同等条件下硅基APD焦平面的非均匀性、有效像元率要优于化合物APD焦平面。此外，硅基半导体制造工艺技术成熟、成本控制能力较强，使得硅基APD器件的成品率较高，成本优势明显。

本文首先介绍基于硅基线性APD焦平面的非扫描式三维成像系统；其次，对硅基线性APD焦平面阵列的器件结构、响应增强、均匀性提升进行探讨；随后，分析高速高精度读出电路的电路架构和关键电路设计；最后，对64×64硅基线性APD焦平面组件的测试结果进行分析。

1　硅基线性APD焦平面三维成像系统

非扫描式的三维成像系统只需要激光器发射出激光脉冲，再通过激光扩束系统将激光照射到目标场景，目标场景反射回的激光信号通过接收光学系统被投射到APD焦平面组件上，由焦平面组件测量并输出每个像素检测到的回波飞行时间，并提供给信号处理器处理，再经数据位置匹配、背景滤除与合成等信息处理获得目标的三维信息（例如距离、几何特征），最终提供给应用终端使用，如图1所示。通常，激光器发射一次激光脉冲便可获得视场内的目标三维信息，因此，要实现高帧频的探测只需要配备高重频能力的激光器。

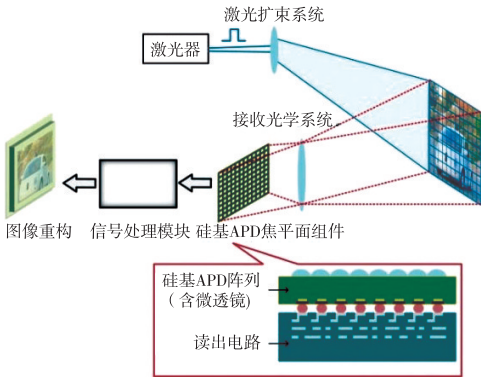


图1　硅基APD焦平面组件非扫描式三维成像示意图

APD焦平面组件由64×64阵列规模的硅基线性APD阵列和读出电路构成，两者通过铟柱倒焊实现互联。硅基APD阵列主要起激光回波信号探测与倍增放大的作用；读出电路主要起像素级信号的转换与鉴别、飞行时间计量、数据处理与高速读出的作用。由于被目标场景反射回的单脉冲激光能量被分散到各个像素单元，单个APD像素获得的激光能量非常微弱。因此，一方面需要提高APD阵列的探测灵敏度，另一方面还需要提高读出电路的信号鉴别能力。硅基线性APD阵列方面除了在器件

结构上进行探测灵敏度提升外，还可以利用微透镜来提高光敏区的占空比；读出电路方面则需要在高速、高增益、低噪声前置TIA电路设计上进行性能提升。

硅材料具有极高的载流子漂移速度，电子漂移速度可达1×10^7 cm/s，空穴漂移速度可达1×10^6 cm/s，从而硅基APD探测器的有源区内部电场远高于饱和漂移临界电场强度（1×10^4 V/cm），使得硅基线性APD焦平面组件能够获得亚纳秒量级的极高响应速度，进而大幅提高硅基APD焦平面三维成像系统的测距精度，可达到厘米量级。另外，硅材料的热稳定性和化学稳定性好，使得硅基APD焦平面三维成像系统的工作温度范围宽、机械结构简单、抗冲击能力强，使用和维护成本低。

2 硅基线性APD阵列芯片设计

硅基线性APD阵列芯片的规模为64×64，像元中心距为150 μm，像元雪崩区大小为90 μm×90 μm；每个像元的阴极单独与对应的读出电路单元连接，所有像元的阳极并接。硅基线性APD阵列芯片的像元采用背照式平面拉通型N^+-p-π-P^+结构，其结构如图2所示，主要由电荷区（N^+）、雪崩倍增区（p）、本征吸收层（π）、阳极接触层（P^+）、保护环（N）、场控环（P）、复合增透膜、反射镜以及微透镜等组成。

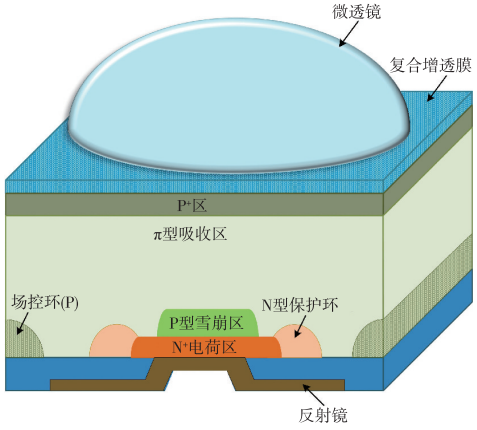


图2 硅基线性APD阵列芯片的像素单元结构

为实现微弱激光回波信号的探测，硅基线性APD阵列芯片引入多种响应增强结构，以提高APD芯片的灵敏度。芯片采用背照结构，与正照结构相比，入光面路径上的光生空穴直接向背面P^+区漂移，经过雪崩区比例小，载流子复合几率小，从而提升光子雪崩注入效率；芯片采用片上集成微透镜技术，将像元边缘入射光汇聚到中心雪崩区，避免光生载流子未经雪崩倍增即通过N型保护环被电荷区抽走，从而提高光电子倍增效率。尤其是在微透镜制作工艺上，采用热熔法和反应离子刻蚀法，直接在APD阵列芯片的像元表面原位集成微透镜，与二次贴装集成方法相比，微透镜与APD像元光敏区的对准精度和焦距控制精度更高；芯片采用对微透镜介质不敏感的复合增透膜结构，在905 nm波段的透过率大于97%；芯片的正面（出光面）集成高效率反射镜，将首次入射到吸收区而未被完全吸收的入射光，重新反射入吸收区，进行二次吸收，等效增加吸收层厚度，从而提高器件的内量子效率。

与单管APD器件不同，非扫描式成像用APD焦平面器件对阵列内各像元间的均匀性要求较高[10]。APD像元光敏区表面的介质膜为二氧化硅膜和氮化硅膜，其厚度的均匀性影响最终进入该像元的光强均匀性，进而影响像元间的响应均匀性。为得到厚度均匀的薄膜，可采用热氧化法进行二氧化硅膜的制作，提高炉管内温度分布的均匀性和气流的均匀性是其关键点，同时使用LPCVD技术可以得到厚度均匀、化学配比良好、折射率稳定的氮化硅膜。另外，N^+电荷区和P型雪崩区的杂质分布对像元的击穿电压和倍增系数均匀性起决定性作用。杂质的分布形貌主要由注入能量和拖尾程度控制，对注入设备进行有效的保养、监控和校准，即可保证精确、稳定地注入能量。杂质的拖尾程度和离子注入的沟道效应有关，当沟道效应较强时，注入杂质分布会出现明显拖尾。在N^+电荷区的制作工艺中，采取倾斜7°的注入角度，以及采用适当厚度的注入掩蔽层以散射入射杂质，可有效抑制沟道效应。P型雪崩区掺杂采用高能注入，能量高达2 MeV以上，注入掩蔽层对高能注入离子几乎起不到明显散射作用，只能采取倾斜注入来降低注入沟道效应。

3 高速高精度读出电路芯片设计

高速高精度读出电路的主要功能是采集和处理APD阵列芯片输入的脉冲电流信号，输出目标反射的激光飞行时间。读出电路采用单片集成技术，将高速前置放大、时刻鉴别、高精度时间间隔测量以及时序控制等功能模块集成在单一硅片上，其整体芯片架构如图3所示，主要包括64×64读出阵

列、32×32 时间-数字转换电路（TDC）、行/列选电路、PLL 时钟电路、LVDS 输出接口以及时序控制等功能模块。每个读出单元包括跨阻放大、时刻鉴别以及数据存储等子电路。为提高时间分辨率、减小时钟驱动难度，相邻 4 个读出单元共用一个 TDC 测时电路。

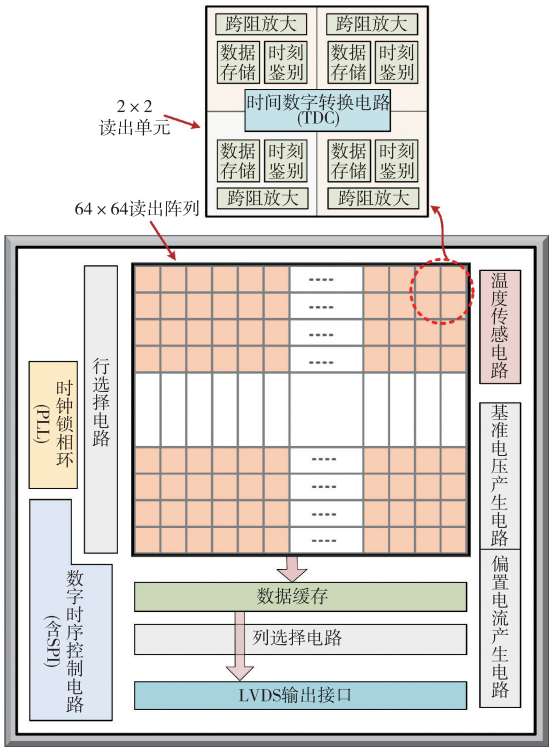
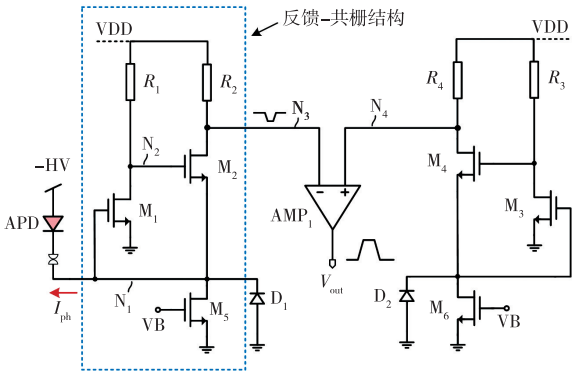


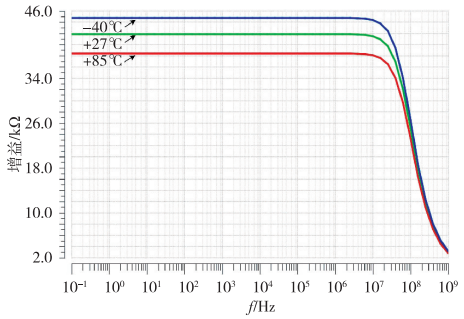
图 3　高速高精度读出电路的芯片整体架构

读出电路芯片采用全局激光信号探测、卷帘式信号读出的方式：当进行第 1 帧探测时，首先进行全局信号复位，然后进行 64×64 阵列的全并行激光脉冲信号探测，在此期间每个读出单元电路对激光飞行时间进行测量和采样，探测阶段结束后再依次逐行逐列输出数字化的时间信息，待整个 64 行的数据信息输出完毕后，再开始进行第 2 帧探测。与单点式或线列式结构相比，系统只需要发射一个激光脉冲便可以获取视场内的整体目标信息，可降低对激光扫描装置的依赖。

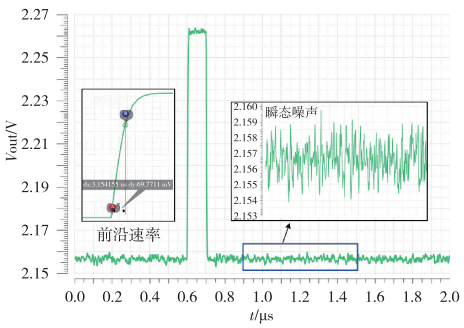
高速前置放大电路作为高速高精度读出电路的核心电路之一，直接将 APD 产生的脉冲光电流转换为脉冲电压，作为读出电路的最前级，在设计上应尽量减小输入等效噪声电流，增加灵敏度，同时设计合理的电路带宽，与输入信号波形匹配，设计足够大的增益，提供足够大的输出摆幅，降低后级噪声贡献。目前主流的前置放大电路包括三种：共栅前置放大器、并联反馈前置放大器和反馈-共栅前置放大器。共栅前置放大器能够提供低的输入阻抗，可以有效隔离 APD 器件的寄生电容，但是在高频段的噪声性能较差；并联反馈前置放大器可同时获得较高的增益和带宽，但是其带宽的扩展和频率稳定性依赖于反馈阻抗和 APD 的寄生电容；反馈-共栅前置放大器结合了前述两种前置放大器的优点，能够同时实现高增益、宽带宽和低噪声的特点，但是其对电源纹波的抑制能力较差。综合上述各前置放大器的优缺点，本设计的高速前置放大电路采用反馈-共栅前置放大器结构，为提高像元电路的抗电源纹波能力，增加一个参考单元结构，将前级信号电压与参考电压相减放大后获得脉冲电压信号，其电路原理图如图 4（a）所示。



（a）电路原理图



（b）交流特性仿真曲线



（c）瞬态特性仿真曲线

图 4　高速前置放大电路

图4(a)中MOS管M_1和M_2、电阻R_1和R_2、MOS管M_5构成了反馈-共栅电路结构:M_2管、M_5管和电阻R_2形成了共栅放大器;M_1管和电阻R_1形成了共源反馈放大器;N_1节点为输入节点,N_3节点为输出节点。当N_1节点电压变化时,反馈放大器通过调整M_2管的栅极电压,使得N_1节点电压向反方向变化,从而达到稳定N_1节点电压的目的。从图中可以看出,电源VDD上的纹波可以直接通过电子R_2影响到N_3节点上的电压,因此利用MOS管M_3和M_4、电阻R_3和R_4、MOS管M_6构成一个反馈-共栅结构的哑元电路,将N_3节点的输出信号与N_4节点的参考信号送入差分放大器AMP_1进行相减放大。硅基线性APD阵列芯片为P型衬底,工作时加载负偏压,因此光生电流方向在输入N_1节点处为流出,为防止强光条件下N_1节点电压下降造成MOS管损坏,在N_1节点处增加了二极管D_1进行钳位,为保持对称性,在哑元电路中增加了相同尺寸的二极管D2。图4(b)为高速前置放大电路的交流特性仿真曲线:常温下的转换增益为41.8 kΩ,−3 dB带宽为75.6 MHz;低温下的转换增益为44.8 kΩ,−3 dB带宽为74.5 MHz;高温下的转换增益为38.4 kΩ,−3 dB带宽为77.1 MHz。前置放大电路在全温区内的转换增益变化量约为8%,带宽变化量约为2%,具有良好的温度稳定性。图4(c)为高速前置放大电路的瞬态特效仿真曲线:瞬态脉冲的前沿上升速率为22.1 mV/ns,噪声峰-峰值为5.85 mV,因此由噪声引起的最大时间抖动约为0.265 ns。

读出电路的激光脉冲飞行时间测量功能由高精度的时间间隔测量电路来实现。本设计所采用的时间间隔测量电路是一种基于延迟线锁相环控制的两段式时间-数字转换结构,如图5所示。采用粗计时测量与细计时分辨相结合的方式来对待测时段进行数字量化,其中粗计时测量由高段计数器完成,细计时基于时钟周期相位分辨的延时链环振来实现。采用上述时钟粗计数与多相位内插细计数相结合的结构优点在于:粗计数电路可满足大动态范围和大量程要求,细计数电路则在此基础上维持较高的时间分辨率,从而可同时满足远距离探测和高分辨率的应用需求[11]。

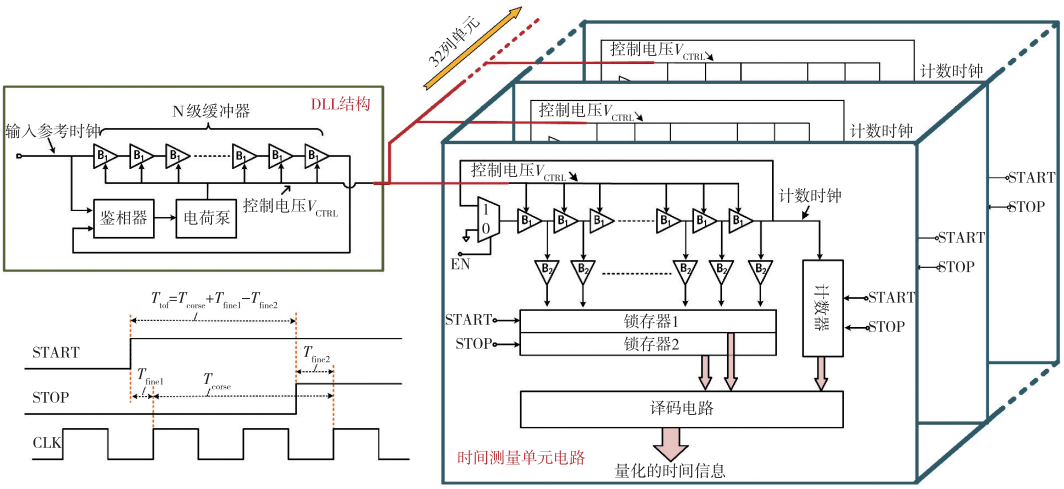


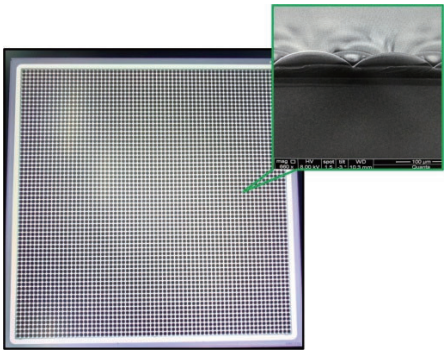
图5 高精度时间间隔测量电路的原理图

图5中的鉴相器、电荷泵、N级缓冲器构成数字延迟锁相(DLL)结构,其功能是产生一个控制电压V_{CTRL},使得单个缓冲器B_1的延迟时间等于输入参考时钟周期的$1/N$。时间测量电路单元内部具有与DLL结构中相同的N级缓冲器,在使能控制EN有效条件下可形成环形振荡器,由于在控制电压V_{CTRL}的调节下,各缓冲器B_1的延迟时间等于输入参考时钟的$1/N$,因此在单元电路内部将产生一个与输入参考时钟同频率的计数时钟。一方面,计数时钟被送入计数器,根据起始信号START和结束信号STOP进行高段位的粗计时T_{corse};另一方面,每个缓冲器B_1的延迟时间固定,利用起始信号START和结束信号STOP对延迟链中各延迟信号进行锁存,可精准测量两个信号前沿分别相对于计数时钟前沿相差多少个延迟时间,从而获得细计时T_{fine1}和T_{fine2}。通过译码电路对粗计时和细计时进行译码和运算,最终可得到计时分辨率为$1/N$时钟周期的激光脉冲飞行时间T_{tof}。例如,输入参考时钟185 MHz,利用16级的延迟链即可获得约0.34 ns的时间分辨率。为降低锁存器负载对缓冲器B_1输

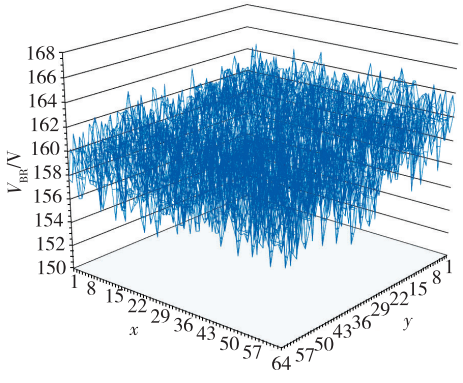
出的影响，设计中插入缓冲器 B_2。读出电路采用 2×2 单元共享一个时间测量单元的架构，因此共有 32×32 个时间测量阵列。考虑到阵列单元控制电压的一致性、抗干扰性以及功耗等因素，设计上选取 32 列时间测量单元共享一个 DLL 控制电压的结构。

4　样品测试及结果分析

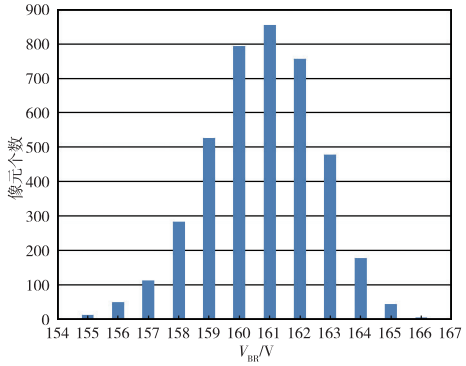
硅基线性 APD 阵列芯片采用 0.5 μm 硅基光电探测器工艺进行设计与制作，如图 6(a)所示，其中片上微透镜使用聚酰亚胺材料光刻后热熔于光敏面上得到，在微透镜和光敏面之间填充使用 SU8 材料玻璃化制作的垫层。微透镜的单元口径为 147 μm，矢高为 33 μm。利用中测探针测试系统，对硅基线性 APD 阵列芯片的各单元进行打点测试，得到 APD 阵列芯片在常温下的击穿电压阵列分布情况、击穿电压直方图统计情况分别如图 6(b)和(c)所示：APD 阵列芯片各单元的击穿电压最大值为 165.5 V，击穿电压最小值为 154.7 V，平均击穿电压为 160.2 V，与击穿电压平均值相比，阵列的击穿电压最大偏差约为 3.4%，非均匀性偏差约为 0.9%。为保证硅基线性 APD 焦平面组件处于安全工作状态，APD 阵列的偏置电压不应超过 150 V。



(a) 阵列芯片的样品实物照片



(b) 击穿电压阵列分布情况



(c) 击穿电压直方图统计情况

图 6　硅基线性 APD 阵列芯片样品及测试结果

高速高精度读出电路芯片采用 0.11 μm CMOS 工艺进行设计与制作，与背照式 APD 阵列芯片通过倒焊互连工艺进行连接，然后封装在带光窗的陶瓷管壳内，形成完整的硅基线性 APD 焦平面组件。为准确地对硅基线性 APD 焦平面组件进行性能评价，需要采用激光发射与对准测试系统，如图 7 所示。该系统能将光纤入射的激光聚焦到小于等于 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。测试用激光的波长为 905 nm，发射频率与组件的探测帧频保持一致，并且能够通过程序控制激光发射延迟时间。

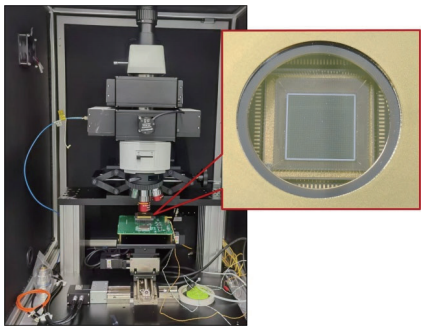
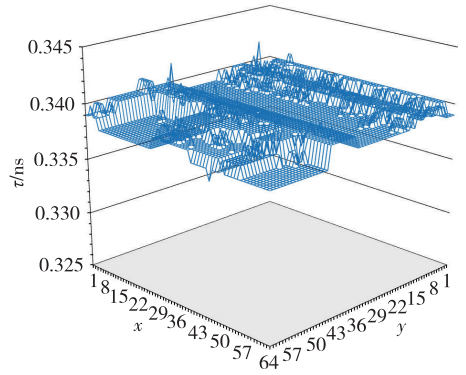


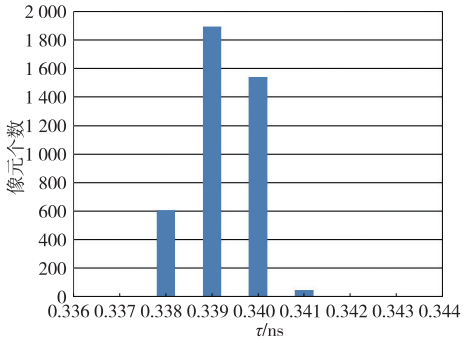
图 7　硅基线性 APD 焦平面组件的测试系统

通过测试系统延迟激光发射时间，然后利用硅基线性 APD 焦平面组件中的像素单元对上述激光延迟时间进行测量输出，最后对输出数据进行拟合，可以得到对应像素单元的时间分辨率。由于硅基线性 APD 焦平面组件的阵列规模为 64×64，需要对 64×64 个像素单元进行测试，得到整个焦平面阵列的时间分辨率分布情况如图 8(a)所示，并对时间分辨率进行直方图统计，如图 8(b)所示。对焦平面阵列各像素单元的时间分辨率进行统计，得到最大像元时间分辨率为 0.343 ns，最小像元时间分辨

率为0.337 ns,阵列的平均时间分辨率为0.339 ns,阵列的时间分辨率非均匀性偏差为0.16%。时间分辨率的非均匀性诱因主要包括前置放大电路噪声引起的时间抖动、32×32时间测量阵列一致性差异以及电源供电能力波动等。



(a) 时间分辨率阵列分布情况

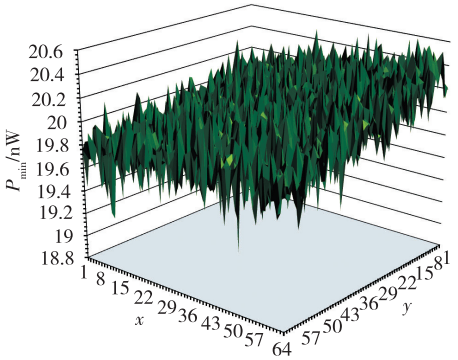


(b) 时间分辨率直方图统计情况

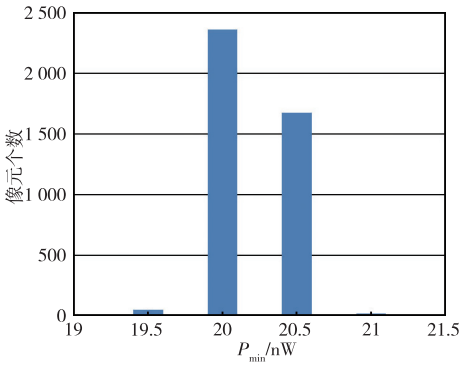
图8 硅基线性APD焦平面组件的时间分辨率测试

在激光发射延迟时间不变的条件下,利用测试系统内部的分光系统可以有效获取激光发射的脉冲能量,因此可以通过逐步调整激光发射的脉冲能量,检测所照射的像素单元是否发生了检测翻转从而输出延迟时间信息来获得单元的最小检测光功率。图9(a)为硅基线性APD焦平面组件最小检测光功率的阵列分布情况,图9(b)则为最小检测光功率的直方图统计情况。整个64×64阵列的最小检测光功率的平均值为20 nW,其非均匀性偏差约为1.3%。

硅基线性APD焦平面组件的主要性能参数测试情况如表1所示:在905 nm波长下的最小检测光功率为20 nW,时间分辨率达到0.339 ns,非均匀性为0.16%,计时位数达到16 bits,64×64阵列的全帧最大帧频达到5 kHz。组件的通信接口采用SPI通信,并且数据输出接口为抗干扰性能较好的



(a) 最小检测光功率阵列分布情况



(b) 最小检测光功率直方图统计情况

图9 硅基线性APD焦平面组件最小检测光功率测试

LVDS差分输出接口。图10为激光光斑照射到硅基线性APD焦平面组件上的成像图,显示了焦平面组件对激光信号的有效探测与跟踪能力。

表1 硅基线性APD焦平面组件主要性能参数

参数	典型值
阵列规模	64×64
像元尺寸	150 μm×150 μm
最小检测光功率	20 nW @905 nm
时间分辨率	0.339 ns
计时位数	16 bits
时间分辨率非均匀性	0.16%
最大帧频	5 kHz

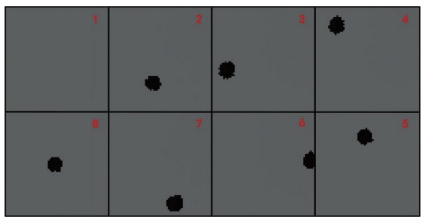


图10 激光光斑跟踪成像图

5 结论

设计一种64×64硅基线性APD焦平面组件,包含硅基线性APD阵列芯片和高速高精度读出电

路。硅基线性APD阵列芯片的像元中心距为150 μm,采用背照式结构、片上集成微透镜、反射镜等措施来提高近红外波段处的探测灵敏度。高速高精度读出电路采用单片集成技术,将高速前置放大、时刻鉴别、高精度时间间隔测量、时序控制等功能模块集成在单一硅片上,可实现64×64阵列的全并行激光脉冲信号探测。测试结果显示:APD阵列芯片击穿电压的非均匀性偏差为0.9%,最小检测光功率的非均匀性偏差为1.3%,时间分辨率的非均匀性偏差为0.16%,因此,硅基线性APD焦平面组件具有良好的阵列均匀性;硅基线性APD焦平面组件在905 nm波长处的最小检测光功率为20 nW,时间分辨率为0.339 ns,计时位数为16 bits,最大帧频达到5 kHz,能够满足高精度、高速、远距离的非扫描式激光脉冲三维成像探测要求。

参考文献:

[1] 张　静,李　强,杨馥霖. 双目立体视觉测量的实现和结构参数选择[J]. 机械设计与制造工程,2018,47(7):1-5.
Zhang Jing, Li Qiang, Yang Fulin. The structural parameter selection and realization of binocular stereo vision measurement [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(7): 1-5.

[2] 刘　博,于　洋,姜　朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程,2019,46(7):190167.
Liu Bo, Yu Yang, Jiang Shuo. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190167.

[3] Farizin A, Vincent E R, Paul F B, et al. Imaging flash lidar for autonomous safe landing and spacecraft proximity operation [C]// AIAA Space Conference, 2016: 5591.

[4] 袁帅映,羊　毅,董　涛,等. 用于机载远程测距的单光子探测关键技术仿真研究[J]. 电光与控制,2015,22(2):80-84.
Yuan Shuaiying, Yang Yi, Dong Tao, et al. Simulation of key technologies of single photon detection for airborne long-distance ranging [J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 80-84.

[5] Ullrich A, Pfennigbauer M. Linear LIDAR versus geiger-mode LIDAR: Impact on data properties and data quality [J]. Proc. SPIE, 2016, 9832: 983204.

[6] Roger S, Howard B, Richard R. Eye-safe laser radar 3D imaging[J]. Proc. SPIE, 2004, 5412(9): 46-56.

[7] William M K, Tricia V, Wang J X, et al. New developments in HgCdTe APDs and LIDAR receivers [J]. Proc. SPIE, 2011, 8012(37): 801230.

[8] 李　潇,石　柱,代　千,等. 64×64 InGaAs/InP三维成像激光焦平面探测器[J]. 红外与激光工程,2018,47(8):117-121.
Li Xiao, Shi Zhu, Dai Qian, et al. 64 × 64 InGaAs/InP 3D imaging laser focal plane detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8): 117-121.

[9] 邓光平,马华平,鹿婷婷,等. 三维成像用128×2线性模式APD焦平面探测器设计[J]. 半导体光电,2020,41(6):784-787.
Deng Guangping, Ma Huaping, Lu Tingting, et al. A design of 128 × 2 linear mode APD detector for 3D imaging [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(6): 784-787.

[10] 郭安然,雷仁方,黄　建,等. 硅基线性模式APD焦平面研制[J]. 半导体光电,2022,43(5):854-860.
Guo Anran, Lei Renfang, Huang Jian, et al. Fabrication of silicon linear-mode APD focal plane arrays [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(5): 854-860.

[11] 赵　捷,赵　野,童纪昀,等. 一种用于TOF激光雷达的多通道时数转换芯片设计[J]. 半导体光电,2021,42(3):342-347.
Zhao Jie, Zhao Ye, Tong Jiyun, et al. A design of multi-channel time-to-digital converter for TOF lidar [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 342-347.

作者简介:

邓光平(1985—),男,高级工程师,主要从事光电探测与成像读出电路设计。