光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022052802

硅基线性模式 APD 焦平面研制

郭安然*，雷仁方，黄　建，邓光平，马华平，黄烈云，谷顺虎，郭　培
（重庆光电技术研究所，重庆 400000）

摘　要： 针对三维激光雷达的应用场景对雪崩光电二极管（APD）焦平面的性能要求，研究并制备了一种 2×128 硅基线性模式 APD 焦平面组件，它由硅基 APD 焦平面阵列、读出电路和制冷封装管壳组成。APD 像元采用拉通型结构，通过大尺寸微透镜实现了高填充因子，通过隔离环掺杂实现了串扰抑制。通过离子注入工艺实现了击穿电压和响应电流的均匀性。设计大带宽低噪声跨阻放大电路、高精度计时电路，实现了窄脉宽、高灵敏度探测。采用气密性封装，实现了 APD 焦平面制冷一体化封装，制冷温差在 40 K 以上。测试结果表明，焦平面的探测阈值光功率可达 3.24 nW，响应非均匀性为 3.8%，串扰为 0.14%，最小时间分辨率可达 0.25 ns，实现了强度信息与时间信息同时输出的功能。

关键词： 雪崩光电二极管；线性模式；焦平面阵列；三维成像
中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0854－07

Fabrication of Silicon Linear-mode APD Focal Plane Arrays

GUO Anran, LEI Renfang, HUANG Jian, DENG Guangping,
MA Huaping, HUANG Lieyun, GU Shunhu, GUO Pei
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400000, CHN)

Abstract: Aiming at the requirements of avalanche photodiode (APD) focal plane in 3D-lidar imaging, a 2×128 silicon linear-mode APD focal plane module was prepared. It consisted of silicon based APD focal plane array, readout circuit and refrigeration package shell. APD pixels adopted the reach-through structure, achieved a high fill factor by large size micro-lens arrays, realized crosstalk suppression through isolation ring doping, and achieved breakdown voltage and response current uniformity through optimization of the ion implantation process. A low noise transimpedance amplifier circuit with large bandwidth and a high precision timing circuit were designed to realize narrow pulse width and high sensitivity detection. Airtight encapsulation was performed to achieve integrated APD focal plane refrigeration encapsulation with a refrigeration temperature difference over 40 K. The test results show that the detection threshold optical power of the focal plane can reach 3.24 nW, and the response non-uniformity is 3.8%, the crosstalk is 0.14%, and the minimum time resolution can reach 0.25 ns, realizing the simultaneous output function of intensity information and time information.

Key words: avalanche photodiode; linear mode; focal plane array; 3D imaging

0　引言

雪崩光电二极管（APD）焦平面是一种由 APD 阵列和读出电路组成的新型三维成像器件，可同时获取目标强度信息和三维距离信息。基于 APD 焦平面的三维激光雷达，具有更大的增益和更快的响应速度，能够准确捕捉到微弱回波信号，因而被广泛

收稿日期：2022－05－28.
*通信作者：郭安然　E-mail：goxo3@163.com

应用于气象、天文、军事侦测，及无人驾驶等领域[1]。

APD 探测器的工作模式分为线性模式和盖革模式。线性模式是指当反向偏压高于开启电压且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，其光电流和入射功率呈线性关系；盖革模式是指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，因此少数几个光生载流子甚至单光子便可倍增输出饱和电流。线性模式 APD 探测器因其在同时获取时间与强度信息上的优势，成为当前三维激光成像雷达的首选。

国外对于 APD 焦平面的研究开始较早，自 1998 年林肯实验室研制出 4×4 的 APD 焦平面探测器以来，各发达国家依托于其半导体行业的领先优势，已经研制出阵列规模更大、探测性能优异的 APD 焦平面[2]。2008 年法国 CEA-Leti 采用 0.35 μm CMOS 工艺，研发出一种 10×10 线性模式 APD 焦平面[3]；同年，美国雷神公司采用 Bi-CMOS 集成工艺，开发了一款高帧频线性模式 APD 三维激光雷达，其具有单光子探测能力，时间精度达 0.6 ns[4]。最新国外 APD 阵列器件规模已达 512×512。

我国在 APD 焦平面的研制方面起步较晚，部分研究还处于理论验证和实验阶段。2012 年，清华大学研制了一种基于线阵 APD 的一维非扫描激光雷达系统，像元数为 1×16，激光波长为 1 064 nm，激光脉冲宽度为 10 ns，发射频率为 1 kHz[5]。2013 年，重庆光电技术研究所[6]设计了一种 64×64 AlGaN APD 阵列的焦平面读出电路，采用能稳定偏压的电容跨阻抗放大器(CTIA)结构，地址选择由移位寄存器实现，积分电容为 70 fF，放大增益为 300，最大可探测光电流为 22.8 pA。2018 年，西南技术物理研究所研制出 64×64 线性模式雪崩焦平面阵列，其最小可探测光功率约为 40 nW @ 1 064 nm，时间分辨率为 1 ns，距离分辨率为 15 cm[7]。

目前三维激光雷达的应用场景对 APD 焦平面的探测灵敏度、时间分辨率、可靠性等提出了更高的要求。本文报道了一种 2×128 硅基线性模式 APD 焦平面组件，采用高性能 APD 阵列芯片和高速读出电路芯片的混合集成。突破了高填充因子、高响应度、高均匀性 APD 光敏芯片设计及大带宽/低噪声跨阻放大电路、高精度计时电路设计等关键技术，实现低串扰、低暗电流、低噪声、低响应非均匀性等特性。该焦平面的最小时间分辨率可达 0.25 ns，响应非均匀性为 3.8%，串扰为 0.14%，探测阈值光功率可达 3.24 nW。

1　硅基线性模式 APD 焦平面设计与制备

1.1　焦平面总体结构与工作原理

APD 焦平面主要由 128×2 的 APD 像素阵列和双边读出电路(ROIC)两部分组成，如图 1 所示。其中 APD 阵列由多个相同的探测像元组成，每个像元的核心探测器件为雪崩光电二极管。APD 像素阵列用于将入射到 APD 焦平面的光转换为电流，读出电路将光电流进行积分、放大、采样保持、滤除噪声和串/并转换等。APD 像素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。其中，APD 单元光敏面尺寸为 120 μm×120 μm，像元中心距为 150 μm。

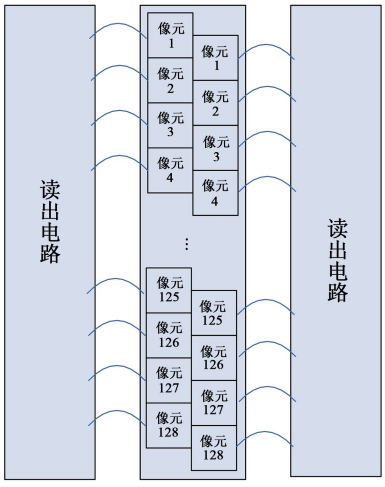


图 1　焦平面总体结构示意图

该焦平面的工作原理框图如图 2 所示。当光照射到 128×2 APD 探测像元时，发生光激发，产生光电流。光电流信号传输到读出电路，经信号放大、时刻比较、峰值保持等处理后得到强度与时间信号，获取的数据最后将通过 LVDS 接口送给 FPGA 进行后期图像数据处理。

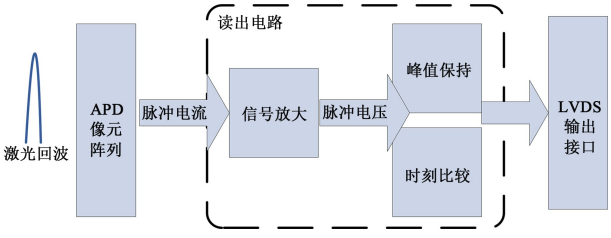


图 2　焦平面工作原理框图

1.2 硅 APD 阵列设计与制备

128×2 APD 阵列的像素单元采用品字形交错排列。单个像元采用拉通型(Reach Through)n^+-p-π-p^+结构,该结构使得 pn 结耗尽层被进一步"拉通"至更大的宽度,因此具有高光电转换效率、高响应度等特点,是目前硅 APD 采用最多的器件构型。像素单元结构如图 3 所示,其主要由微透镜、增透膜、正面电极、光敏区(n^+)、雪崩倍增区(p)、本征吸收层(π)、衬底(p^+)、背面电极、保护环,以及隔离环组成。

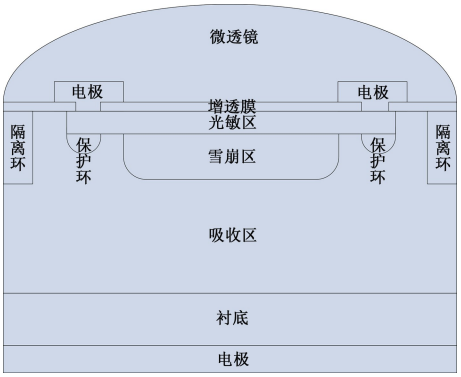
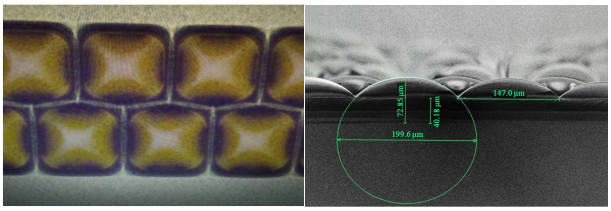


图 3 像素单元结构

其中,微透镜起聚光的作用,增透膜主要起减小入射光反射,提高器件量子效率的作用。光敏区是高掺杂的 n^+ 层,主要为 APD 提供高的内建电场。雪崩区为 p 层,主要为 APD 提供雪崩倍增效应。本征吸收层为低掺杂的高阻层,APD 工作时完全耗尽,主要起吸收光子作用。衬底为高浓度 p^+ 层,主要与背电极形成欧姆接触。保护环为具有特殊杂质分布的 n 型层,主要起防止器件边缘击穿,保证器件倍增倍数的作用。隔离环为 p 型层,主要起抑制像元之间电串扰的作用。背面电极主要起电学连接的作用。

1.2.1 高填充因子集成微透镜阵列

为实现高填充因子,在 APD 像元上集成了 150 μm 大尺寸微透镜。微透镜使用聚酰亚胺光刻和热熔方式来制备。微透镜缓冲层采用 SU8 光刻来实现,其主要起到平坦化 128×2 APD 焦平面芯片表面,提供微透镜聚光长度所需要的结构支撑。微透镜光刻图案直接为微透镜热熔做掩膜,其光刻后形貌直接影响微透镜成型后的形状。为了提高微透镜的占空比,微透镜形状应设计为方形,而且微透镜之间的间距应尽可能小;为了提高微透镜曲率,微透镜四个角形状应设计为圆形,这样微透镜顶部弯曲度会更好。为了兼顾微透镜的占空比和顶部的弯曲度,采用两次涂覆/光刻聚酰亚胺工艺。第一次工艺制作时采用占空比高、间隔小的方形图案,第二次工艺制作采用微透镜设计四个角为倒圆角、间隔稍大的图案。然后先用较低温度进行预热熔,蒸发聚酰亚胺的部分水分,固化微透镜底部边界,再采用较高温度热熔,微透镜顶部冠状球形成型,如图 4(a)所示。



(a) 光学显微镜俯视图 (b) SEM 剖面图

图 4 微透镜阵列光学显微镜俯视图与 SEM 剖面图

微透镜剖面 SEM 形貌如图 4(b)所示。经过测量,微透镜厚度 h 为 73 μm,单元口径 D 为 147 μm,矢高 S 为 33 μm,计算可得有效填充因子大于等于 93.4%。

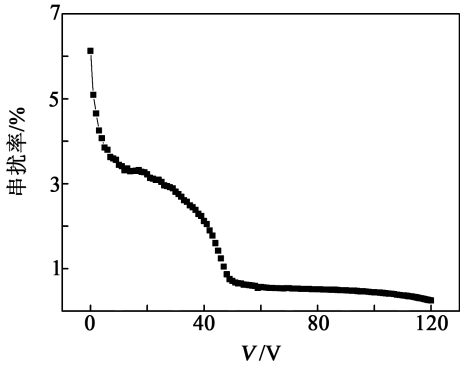
1.2.2 串扰抑制

微透镜阵列在提高填充因子的同时,通过将入射光汇聚到像元中间的光敏区,可以起到抑制像元光串扰的作用。而电学串扰主要来自于光生载流子的横向扩散,因此可以通过隔离环注入控制像元边缘的电场,限制光生载流子的横向移动,达到减小像元串扰的目的。

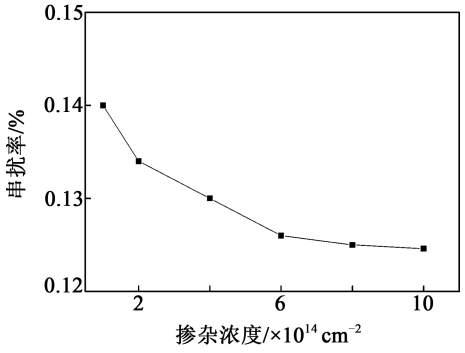
隔离环结构通过在相邻像元中间注入加高温推结的方式形成。图 5 是含有隔离环的器件像元间串扰(光源波长为 905 nm)随电压和注入浓度的变化关系。由图 5(a)可见,隔离环对器件串扰有抑制作用,且串扰随偏置电压的升高而减小。隔离环有效地抑制了表面 n^+ 区的载流子扩散,而随着电压的增加,器件内垂直电场强度增加,载流子纵向漂移速度远大于扩散速度,串扰随之减小。

隔离环注入浓度与串扰也存在一定关系,提高注入浓度可以阻挡载流子横向移动从而减小串扰,如图 5(b)所示。当注入浓度为 2×10^{14} cm^{-2} 时串扰即可抑制到 0.14%,继续提高注入浓度可使串扰小幅下降。但是需要指出的是,当隔离环浓度过大时,在对单个像元打点测试时可能出现边缘击穿现象,即光敏区和隔离环之间由于电压差过大导致光敏区与隔离环之间发生击穿。因此,考虑到自动化

测试的需要，应折中考虑隔离环注入浓度。



（a）　串扰随电压的变化



（b）　串扰随注入浓度的变化

图 5　隔离环器件像元间串扰随电压和注入浓度的变化

1.2.3　响应均匀性

像元阵列中像元响应均匀性对成像效果尤为关键。线性模式 APD 通常工作在 100 倍增益的条件下，工作点电压达到器件击穿电压的 90%左右且电压变化对增益 M 的影响十分显著，如图 6 所示。因此控制 APD 阵列响应均匀性的关键在于控制击穿电压一致性。

影响 APD 击穿电压的主要因素是硅材料电阻率的均匀性和雪崩区高能注入的均匀性。由于硅材料为外购，工艺中主要优化的是高能注入的均匀性。雪崩区注入剂量对器件的击穿电压影响很大。当雪崩区注入剂量变化 2×10^{10} cm^{-2}，击穿电压约变化十几伏，高能离子注入的均匀性主要需要对系统压力补偿和后加速相位进行优化，其次需要寻求束流大小、注入时间、注入角度等工艺参数的最佳组合，以达到良好的片内均匀性和片间重复性。优化后的击穿电压和光电流均匀性如图 7(a)，(b)所示。图 7(a)为对单行 130 个像元(包含 2 个参考像元)击穿电压进行了统计，约 55%的像元击穿电压集中在 1 V 的偏差范围内(177.5～178.5 V)，约 86%的像元击穿电压集中在 2 V 的偏差范围内(177～179 V)，击穿电压均匀性良好。图 7(b)为对器件单行 130 个像元在施加同一偏压、光强情况下的光电流进行了统计结果，其统计分布情况与击穿电压趋势一致，非均匀性约为 3.3%。

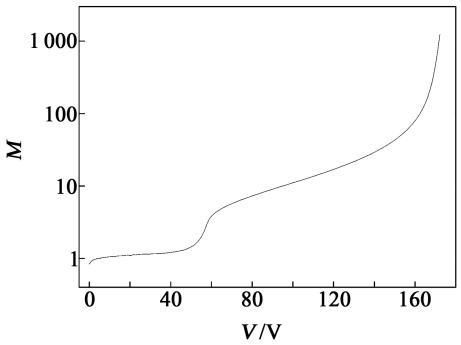
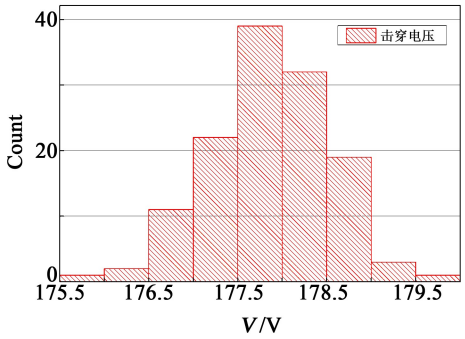
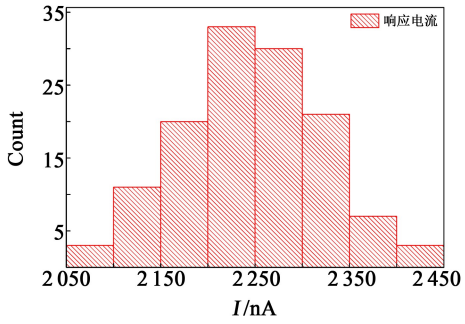


图 6　APD 单元增益曲线



（a）　APD 阵列击穿电压分布



（b）　APD 阵列光电流分布

图 7　APD 阵列击穿电压和光电流均匀性分布情况

1.3　读出电路设计

读出电路的优劣直接决定了系统的性能，APD 焦平面探测器的读出电路需要具备放大光电流、时刻鉴别和强度积分等功能。

线性模式 APD 焦平面探测器的读出电路由前端跨阻放大器、中置放大器、时刻鉴别电路、峰值保持电路、模拟数字转换电路(ADC)及时间数字转换电路(TDC)组成，其原理图如图 8 所示。前端跨阻放大器首先将脉冲电流信号转换为脉冲电压信号；中置放大器对模拟输出信号进行再放大，满足高增益要求的同时增加信号驱动能力；时刻鉴别电路对

放大后的脉冲信号进行起止时刻检测判定，然后将鉴别信号送入 TDC；TDC 结合片外 start 信号和鉴别信号的 stop 信号测得时间信息并完成数字化转换；峰值保持电路获取脉冲峰值，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 电路转换后的时间数据和强度数据采用 LVDS 的数据模式输出到芯片外。

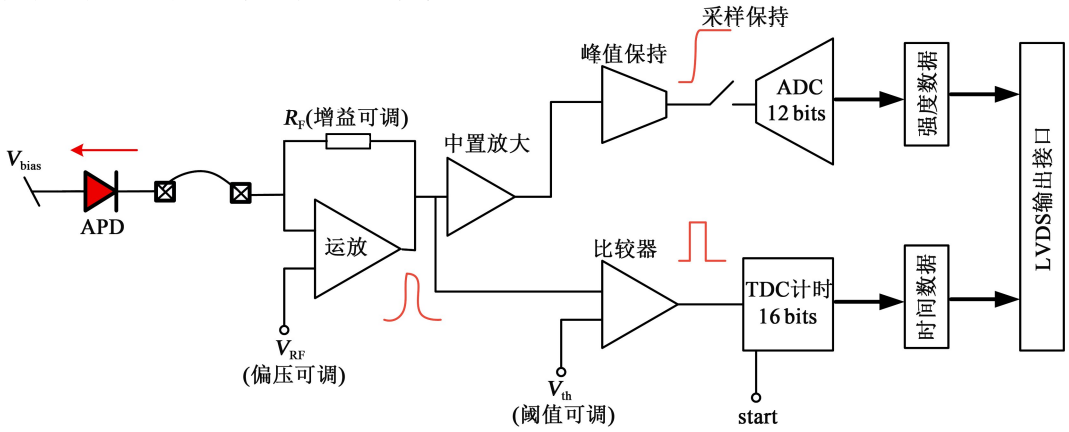


图 8 读出电路原理图

前置跨阻放大器采用三级单端放大器级联提供高增益，中置放大电路采用电阻反馈放大结构。放大电路部分版图如图 9 所示。采用 0.13 μm CMOS 集成电路工艺流片后对电路进行测试，上升时间达到 2 ns，时间抖动达到 0.197 ns，跨阻增益达到 230 kΩ，等效噪声功率达到 0.095 pW/Hz$^{1/2}$。

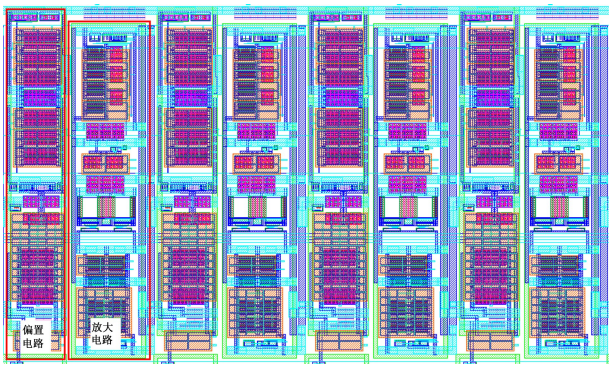


图 9 放大电路部分版图

高精度时间数字转换电路采用基于延迟线锁相环控制的两段式时间-数字转换方法(TDC)，由基于时钟周期相位分辨的低段可配置环振 TDC、高段计数型 TDC、延迟链锁相环、译码电路以及锁存器等模块组成。高段 TDC 由 12 bit LFSR 伪随机计数器来实现，计数时钟为内部环振产生的 250 M 参考时钟，主要用于提高读出电路的计数量程；低段 TDC 由闭环延迟线 TDC 实现，通过相位检测实现低段位数转换。当触发信号的上升沿到来时，16 相位延时时钟的状态被采样到触发寄存器中，通过片上编码为 4 bit 数据与 12 bit LFSR 伪随机数计器串行输出。高低段计数配合完成完整的 16 bit 计数，测量范围可达 16.384 μs，时间分辨率达到 0.25 ns。读出电路完成流片后，通过延时激光发射时间，然后测量 TDC 输出的时间计数值，最后进行数据拟合，得到如图 10 所示的拟合曲线。从图中拟合数据来看，该 TDC 计时电路的时间分辨率可达到 0.25 ns，与仿真设计值相符合。

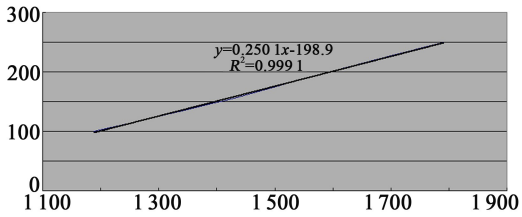


图 10 高精度计时 TDC 测试数据拟合曲线

1.4 制冷一体化封装

封装采用金属陶瓷结构，如图 11 所示。管壳采用带有热沉的 PGA 陶瓷管壳，管壳内部贴装半导体制冷器(TEC)，APD 阵列芯片及读出电路芯片贴装到电路板上，芯片之间及芯片与电路板之间采用引线键合的方式进行互连，金属盖板中间设计光窗，

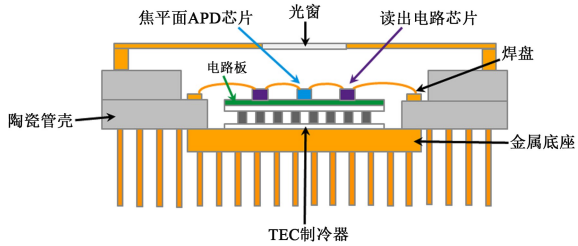
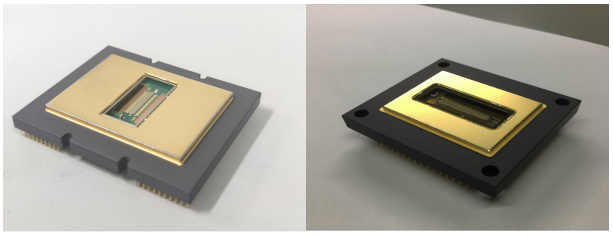


图 11 APD 焦平面封装结构图

采用平行缝焊工艺进行密封。密封漏率小于等于 1×10^{-2} Pa·cm^3/s，密封腔体内的气氛为氩气。当外部环境温度为 60 ℃时，可制冷至室温。我们使用不同大小的管壳封装了 A 型和 B 型两款 APD 焦平面组件，封装好的 APD 焦平面实物如图 12 所示。



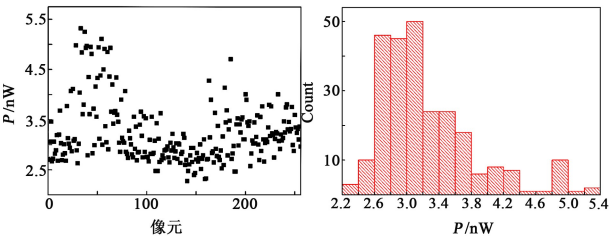
（a）　体积较大的 A 型　　（b）　体积较小的 B 型

图 12　APD 焦平面实物照片

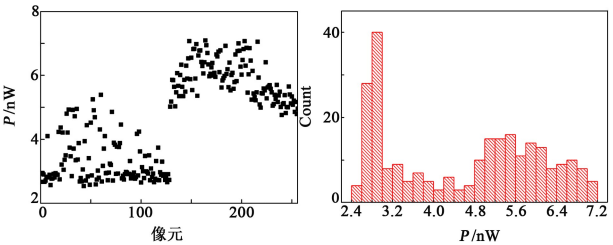
2　性能参数测试与功能演示

硅基线性模式 APD 焦平面的关键性能参数为探测阈值光功率和响应度的均匀性。探测阈值光功率直接影响激光雷达能够探测的最大距离，时间分辨率决定了激光雷达的测距精度。探测阈值光功率是指探测器组件输出信噪比（SNR）为规定值时探测器组件接收到的峰值光功率，主要由噪声决定；焦平面响应度均匀性影响整个器件的成像质量，主要由 APD 阵列均匀性和放大电路均匀性决定。

通过测试，得到探测阈值光功率。A 型器件的探测阈值光功率分布和直方图统计如图 13（a）所示。阈值光功率整体分布较均匀，主要集中在 3 nW 附件，个别像元达到 4 或 5 nW，平均探测阈值光功率为 3.24 nW。B 型器件的探测阈值光功率分布和直方图统计如图 13（b）所示。与 A 型器件不同，从图 13（b）中可以看出 B 型器件的第一行 128 个像元和第二行 128 个像元的阈值光功率存在较明显的差异，第二行的阈值光功率水平约是第一行的两倍。



（a）　A 型器件探测阈值光功率分布

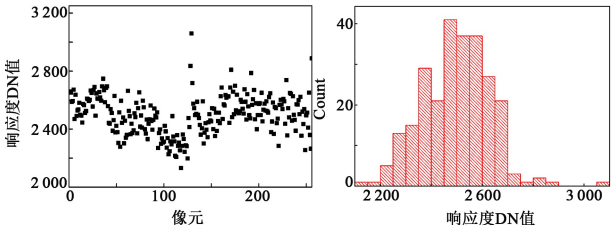


（b）　B 型器件探测阈值光功率分布

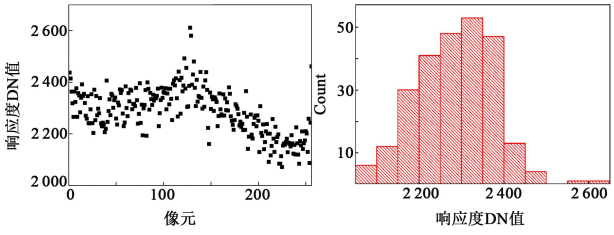
图 13　APD 焦平面阈值光功率分布及直方图

对于 B 型器件两行像元阈值光功率的差异，我们进行了初步分析。APD 阵列芯片、读出电路芯片位置及电路板布线均采用对称设计或对称排布，仅有 3.3 和 1.8 V 电源分别分布在器件的两侧。因此可能是电源引入的噪声导致了 B 型器件出现的差异，而 A 型器件由于体积比较大，布线间距相对稀疏，电源噪声的影响不明显。

通过测试，得到响应度均匀性数据。器件的响应度分布和直方图统计如图 14 所示。A/B 两型器件的响应度分布均比较均匀，B 型器件两行像元之间未出现明显的差异。A 型器件的响应非均匀性为 3.78%，B 型器件为 3.81%。



（a）　A 型器件响应度分布



（b）　B 型器件响应度分布

图 14　APD 焦平面响应度分布及直方图

为验证线性模式 APD 焦平面的成像效果，我们自行研制了 3D 成像激光雷达演示样机。自研的 3D 成像激光雷达采用线型激光光源和 2×128 线阵

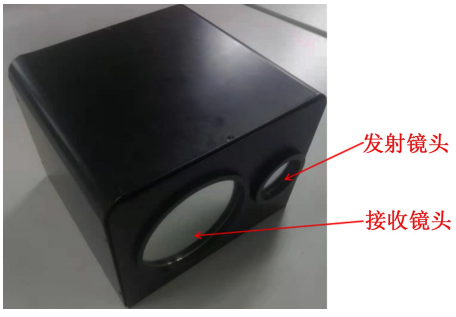
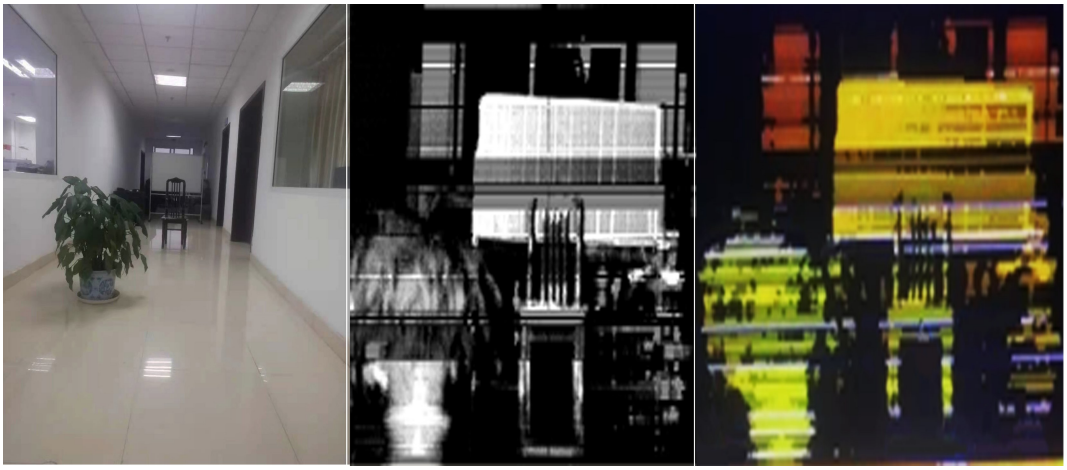


图 15　自研 3D 成像激光雷达样机

APD 焦平面，与传统的多线激光雷达相比，避免了多路激光器与探测器一一对应，光学调校更为容易，且分辨率更高，垂直分辨率达到 256 线。如图 15 所示，大功率 905 nm 激光器发出的光经过镜头整形后形成线型光斑出射，被测物体返回的光由接收镜头汇聚到 APD 焦平面转换为强度和距离信息。

我们将自研 3D 成像激光雷达置于可转动的云台上进行成像实验。实验过程中，在长约 20 m 的过道中，按距离远近分别放置了花盆，木椅，白色写字板三个主要测试目标。通过强度图像可以清晰地看见花盆，木椅，写字板的轮廓和反光强度；通过深度图像，可以分辨出三者之间的距离，如图 16 所示。



(a) 实物 (b) 强度像 (c) 距离像

图 16 3D 激光雷达成像效果

3 结论

设计并制备了一种 2×128 阵列规模、150 μm 像元中心间距的平面结构 Si-APD 雪崩二极管阵列芯片，通过引线互连与设计的单片 CMOS 读出电路组成硅基线性模式 APD 焦平面。经测试，焦平面的探测阈值光功率可达 3.24 nW，响应非均匀性为 3.8%，时间分辨率可达 0.25 ns，实现了强度信息与时间信息同时输出功能。研究结果已在激光雷达领域得到广泛应用。

参考文献：

[1] 赵洪利，范有臣，孙华燕，等. 基于盖革模式 APD 阵列的非扫描激光三维成像雷达研究综述[J]. 激光与红外，2013，43(10)：1083-1088.
Zhao Hongli，Fan Youchen，Sun Huayan，et al. Review about 3D laser radar system based on Geiger-mode APD array[J]. Laser & Infrared，2013，43(10)：1083-1088.

[2] Aull B F，Loomis A H，Gregory J A，et al. Geiger-mode avalanche photodiode arrays integrated with CMOS timing circuits[C]// Device Research Conf. Digest，1998.

[3] Guellec F，Andresen B F，Fulop G F，et al. Advanced pixel design for infrared 3D LADAR imaging[J]. Proc. SPIE，2008，6940：69402M.

[4] Asbrock J，Bailey S，Baley D，et al. Ultra-high sensitivity APD based 3D LADAR sensors：linear mode photon counting LADAR camera for the UltraSensitive detector program[J]. Proc. SPIE，2008，6940：69402O.

[5] 郑睿童，吴冠豪. 基于线阵 APD 探测器的脉冲式一维非扫描激光雷达系统[J]. 红外与激光工程，2012，41(1)：96-100.
Zheng Ruitong，Wu Guanhao. Pulsed one-dimensional scannerless LiDAR system based on linear APD array[J]. Infrared and Laser Engineering，2012，41(1)：96-100.

[6] 邓光平，刘昌举，祝晓笑，等. 一种弱光成像用 AlGaN APD 阵列的读出电路设计[J]. 半导体光电，2013，34(4)：569-572，575.
Deng Guangping，Liu Changju，Zhu Xiaoxiao，et al. Readout IC for low-level light imaging AlGaN APD arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics，2013，34(4)：569-572，575.

[7] 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)：107-111.
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)：107-111.

作者简介：

郭安然(1988—)，男，重庆市人，博士，高级工程师，主要从事硅基高性能光电探测器研发。