

APD阵列及其成像激光雷达系统的研究进展

李兵, 杨赟秀, 李潇, 芮长冬, 寇先果, 孔繁林, 袁臻, 郑博仁

Research progress of APD array and its imaging LiDAR system

引用本文:

李兵, 杨秀, 李潇, 芮长冬, 寇先果, 孔繁林, 袁臻, 郑博仁. APD阵列及其成像激光雷达系统的研究进展[J]. [激光技术](#), 2023, 47(3): 310–316.

LI Bing, YANG Yunxiu, LI Xiao, GUO Changdong, KOU Xianguo, KONG Fanlin, YUAN Liu, ZHENG Boren. Research progress of APD array and its imaging LiDAR system[J]. [Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays](#), 2023, 47(3): 310–316.

您可能感兴趣的其他文章

1. 基于APD面阵探测器的非扫描激光主动成像雷达

引用本文: 陈德章, 张华, 冷杰, 等. 基于APD面阵探测器的非扫描激光主动成像雷达[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 775–778.

2. 雪崩光电二极管电外差混频技术及其参量优化

引用本文: 吴国秀, 段发阶, 郭浩天. 雪崩光电二极管电外差混频技术及其参量优化[J]. [激光技术](#), 2015, 39(6): 802–805.

3. APD探测系统的噪声特性及其影响因素研究

引用本文: 刘贺雄, 周冰, 高宇辰. APD探测系统的噪声特性及其影响因素研究[J]. [激光技术](#), 2018, 42(6): 862–867.

4. 碲化物 II 类超晶格中远红外探测器的研究进展

引用本文: 谢修敏, 徐强, 陈剑, 等. 碲化物 II 类超晶格中远红外探测器的研究进展[J]. [激光技术](#), 2020, 44(6): 688–694.

5. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试

引用本文: 李勇军, 邹建, 甘泉露, 等. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 803–806.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0310-07

APD 阵列及其成像激光雷达系统的研究进展

李 兵, 杨赞秀*, 李 潇, 芮长冬, 寇先果, 孔繁林, 袁 璠, 郑博仁
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 激光雷达 (LiDAR) 广泛应用于航天器导航、安防监控、3-D 测绘、自动驾驶汽车、军事装备及机器人等领域, 具有重要的军事和民用价值。雪崩光电二极管 (APD) 阵列探测技术在 LiDAR 的发展过程中发挥着至关重要的作用。介绍了 LiDAR 和 APD 阵列的应用背景, 综述了 APD 阵列和 LiDAR 系统的发展历程和最新进展, 最后总结了 APD 阵列探测技术的发展前景和研究趋势。

关键词: 激光技术; 激光雷达; 探测器; 雪崩光电二极管阵列; 自动驾驶汽车

中图分类号: TN249; TN958.98 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.004

Research progress of APD array and its imaging LiDAR system

LI Bing, YANG Yunxiu, LI Xiao, GUO Changdong, KOU Xianguo, KONG Fanlin, YUAN Liu, ZHENG Boren
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Light detection and ranging (LiDAR) is widely used in spacecraft navigation, security monitoring, 3-D mapping, autonomous vehicle, military equipment, robots, and other fields. It has important military and civil value. Avalanche photodiode (APD) array detection technology plays a vital role in the development of LiDAR. In this paper the background of LiDAR and APD array was first introduced, then the development history and latest progress of APD array and LiDAR system was summarized. Finally, the development prospect and research trend of APD array detection technology was summarized.

Key words: laser technique; light detection and ranging; detectors; avalanche photodiode array; autonomous vehicle

引 言

近年来,随着量产车上自动辅助驾驶系统的需求不断增加,自动驾驶技术也在飞速发展。在自动驾驶的领域,激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)作为一种新发展起来的探测感知设备,它具有以下优势:(1)能够识别一定遮蔽和伪装的物体;(2)探测精度高,一般在厘米级别以内;(3)能够精确获得周围目标的速度、距离、高度等信息;(4)抗干扰能力强。因此能够准确感知周边的环境,不会误判和漏判车辆周围的障碍物。激光雷达在汽车领域的高速发展,推动了光电探测器件的大量应用。目前,激光雷达在不同系统应用场景下主要使用光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)、雪崩光电二极管(avalanche photodiode,

APD)、硅光电倍增管(Si PMT)作为探测器件^[1]。APD 探测器是成像激光雷达目前最有前景的探测器,本文作者综述了 APD 阵列的国内外发展情况,对于本领域的研究者具有很好的参考价值。

1 APD 阵列国外研究现状

APD 探测器所加的反偏电压小于击穿电压时,工作在线性模式(linear-mode, LM)^[2],此时,探测器的输出电流与入射光强近似线性相关;当所加的反偏电压高于击穿电压时,探测器工作在盖格模式(Geiger-mode, GM)^[3],APD 雪崩电离程度更高,能够响应单个入射的光子,适用于极微弱光强的检测。

APD 探测器根据探测器的规模经历了单元、行列、小面阵到大面阵探测的发展历程,受限于单元探测器的面积,其应用存在诸多限制,但随着压缩感知理论的成熟和图像处理算法的研究,单元探测技术仍然有应用发展空间。APD 行列、阵列探测器是目前激光雷达用探测器的主流发展方向之一,其主要由 APD 探测器件阵列和读出电路(read out integrated circuit, ROIC)两部分构成。外界环境噪声的影响、APD 阵列

基金项目:四川省军民融合产业发展专项资金资助项目(2021G20235)。

作者简介:李 兵(1995-),男,硕士研究生,现主要从事焦平面探测器读出电路的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangyang_@126.com

收稿日期:2022-06-17;收到修改稿日期:2022-07-29

探测器像素单元的一致性、ROIC 通道间的串扰是影响其性能和规模的关键因素。

1.1 LM APD 阵列研究现状

美国先进科学概念公司基于 LM APD 阵列研制了 TigerEYE 和 DragonEYE 闪光激光雷达。

2004 年,采用探测器为 128×128 的线性 InGaAs APD 阵列的单脉冲闪光激光雷达 TigerEYE 问世^[4],它将可进行模拟和数字处理的多功能读出电路凸点键合到线性模式雪崩光电二极管阵列上,ROIC 的每个单元都包含独立计算从发射激光脉冲到捕获反射脉冲光束的时间的电路,脉冲激光波长为 1570 nm,脉宽为 5 ns,工作重频为 1 Hz~20 Hz,探测距离为 0.06 km~1.1 km,系统体积为 11 cm×11.2 cm×12.1 cm,重量小于 2 kg。

2009 年,得到空间探索公司支持的、另一款采用探测器为 128×128 的线性 InGaAs APD 阵列的闪光激光雷达 DragonEYE 问世^[5]。DragonEYE 系统安装在 STS-127(奋进者号)和 STS-133(发现号)航天飞机上,成功捕捉到 3 维图像。接收光学系统焦距为 17 mm,视场角为 45°,帧频最高为 30 frame/s,体积为 11.2 cm×13.2 cm×11.9 cm,重量为 3 kg,最大探测距离为 2 km,测距精度为 0.1 m。

2012 年,美国雷神公司为各种应用开发了一系列高性能的脉冲激光雷达雪崩光电二极管阵列,如图 1 所示。碲镉汞红外雪崩光电二极管阵列的尺寸包括 32×2、10×10、2×128、64×48、4×256 和 256×256^[6]。美国国家航空航天局自主精确着陆和危险探测回避技术项目所使用的是 256×256 雪崩探测器阵列,具有 70% 的量子效率^[7]。

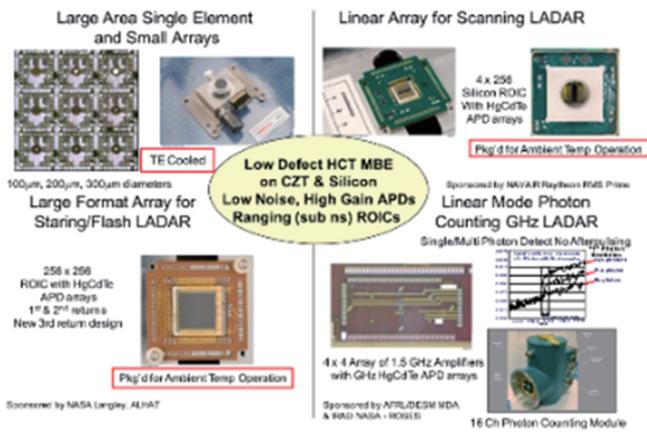


图 1 线性模式雪崩光电二极管阵列^[6]

Fig. 1 Linear mode avalanche photodiode array^[6]

2014 年,美国 DRS 公司设计并制作了基于高密度垂直集成结构的 2×8 线性模式 HgCdTe APD 阵列。该

阵列可以探测从可见光到中频中波红外 (medium wavelength infrared, MWIR) 的光子^[8];还设计制作了一个像素间距为 80 µm 的 4×4 HgCdTe APD 阵列,用于二氧化碳闪光激光雷达^[9-10];此外,设计了用于近红外门控主动/被动成像的 128×128 中波 HgCdTe APD 阵列,该阵列的探测距离可达 9 km,获得了小于 10 个光子的灵敏度^[11]。法国实验室 CEA/LETI^[2] 研制了一台 3 维脉冲激光雷达,阵列长度为 320×256,间距为 30 µm。能够存储每个像素中一个激光脉冲的飞行时间 (time of flight, TOF) 和强度^[12],脉冲激光波长为 1570 nm,脉宽为 8 ns,最大功率为 8 mJ,APD 阵列在 6 V 的低反向偏置电压下,获得了 23 倍的平均增益,探测距离超过 40 m,距离分辨率约为 15 cm。从 3 维视频中提取的距离图像如图 2 所示。

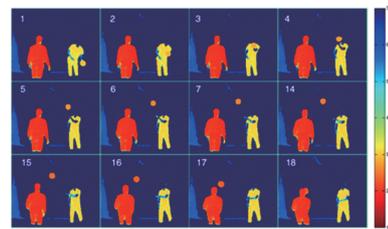


图 2 距离图像序列^[12]

Fig. 2 Sequence of range image^[12]

2019 年,美国国家航空航天局的 SUN 等人开发了一套线性模式单光计数 HgCdTe APD 焦平面阵列, HgCdTe APD 阵列使用高密度垂直集成光电二极管架构,如图 3 所示^[13]。ROIC 中的 APD 前置放大器直接安装在 HgCdTe APD 阵列下方,以最大限度地减少输入杂散电容。在 ROIC 和 HgCdTe APD 阵列之间还有一个挡光板,以最大限度地减少 ROIC 单元电路对发射的光子的检测。集成探测器 (含制冷器) 组件的质量为 0.8 kg,功耗 7 W 左右,2×8 的 HgCdTe APD 焦平

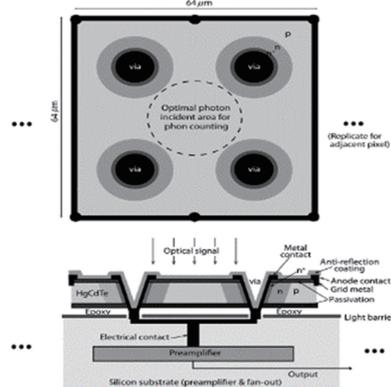


图 3 HgCdTe APD 的示意图^[13]

Fig. 3 Diagram of HgCdTe APD^[13]

面(focal plane array, FPA)的尺寸为 $64\ \mu\text{m} \times 64\ \mu\text{m}$, 像素间距为 $64\ \mu\text{m}$, 具有 $0.9\ \mu\text{m} \sim 4.3\ \mu\text{m}$ 波长的光谱响应, 在 $250\ \text{kHz}$ 的暗计数率下, 光子探测效率高达 70% , 时间抖动小于 $0.5\ \text{ns}$ 。微透镜阵列与 APD 阵列集成在一起, 将探测器的填充因子提高到接近 100% 。在 APD 增益高达 1900 倍时, HgCdTe APD 的实际暗电流小于 3 万个电子/(s · pixel), 探测器的模拟输出具有 $6\ \text{ns}$ 半峰全宽的单光子脉冲响应宽度。

2020年, 美国国家航空航天局兰利研究中心的 PRASAD 等人开发出一种创新的、非致冷的光子传感集成电路(photon sensing integrated circuit, PSIC)异质结光晶体管(heterojunction phototransistor, HPT)器件^[14]。图4展示了FPA的规格和集成的样品。这种基于InGaAs的PSIC HPT设备是一种室温检测器和成像器, 具有 320×256 规模和 $30\ \mu\text{m}$ 尺寸的像素, 并在 $0.9\ \mu\text{m} \sim 1.7\ \mu\text{m}$ 的短波红外(short wave infrared, SWIR)光谱区域工作。它是一种连续运行(即零恢复时间)、零过量噪声和线性模式(即能够表示光子数)的光子传感探测器和成像器。通过HPT放大而不是传统的雪崩倍增机制, 这种InGaAs HPT同时表现出大于 1000 的信号放大增益, 即增益高于 20 倍, 暗电流面密度低于InGaAs APD的 $1/10$ 。当前的HPT表现出更高的速度、更高的增益、更低的暗电流和噪声, 实现了光子检测的最高信噪比。

Pixel Pitch (μm)	30
Optical Fill Factor	87%
Spectral Response (μm)	from 0.9 to 1.7
Quantum Efficiency	> 65%
Digital Output Frame (fps)	296
Exposure time (ms)	0.00636
Mean Detectivity D^* ($\text{cm}^2/\text{Hz/W}$)	3×10^{14}
Noise Equivalent Irradiance (photons/cm ² s)	3.5×10^{-9}
RMS Noise (photons)	0.2
Pixel Amplification Gain	> 1000
Readout Integrated Circuit (ROIC)	IndigoFLR IS C9909
Readout Noise (electrons)	350 ~ 700

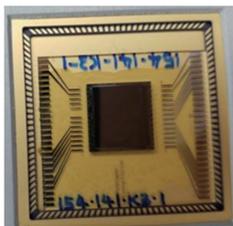


图4 焦平面探测器规格和集成样品^[14]

Fig. 4 Specifications of focal plane detector and the integrated samples^[14]

2021年, 美国国家航空航天局的SUN等人开发了一种新型太空激光雷达^[15], 它使用了 2×8 线性模式光子计数的HgCdTe APD焦平面阵列探测器, 如图5所



图5 2×8 HgCdTe APD 探测器制冷器组件^[15]

Fig. 5 2×8 HgCdTe APD detector cooler assembly^[15]

示^[15], 提供了 $0.9\ \mu\text{m} \sim 4.3\ \mu\text{m}$ 波长的近量子限制的接收器灵敏度。通过调整激光功率和 APD 增益, 可以提供 6 个数量级的动态范围, 能够测量从数百公里到目标表面附近的范围和表面反射率。

1.2 GM APD 阵列研究现状

GM APD 阵列可实现单光子探测的灵敏度, 具有高的时间分辨率和距离分辨率、较高的探测效率、较低的功耗、体积小、增益高等特点, 可以满足远距离高分辨率 3 维成像激光雷达的应用需求。

1998~2003年, 林肯实验室采用混合集成技术连续研制了 GEN-I^[16]、GEN-II^[17]、GEN-III^[18] 激光雷达。如图6所示, GEN-III将 32×32 APD 阵列和 32×32 CMOS 计时电路阵列混合集成。2010年, 该实验室采用 32×128 的InP/InGaAsP 盖革 APD 阵列研制出机载 3 维成像激光雷达, 能够全天时在 $3\ \text{km}$ 高空对地面进行 $2000\ \text{km}^2/\text{h}$ 的快速 3 维成像, 距离精度为 $0.3\ \text{m}$ ^[19]。2015年, 该实验室研究出近红外波段响应性能更佳的 256×256 像元 InP/InGaAs APD 阵列^[20-22]。他们的长期目标是开发具有 1024×1024 的 GM APD 阵列^[23]。

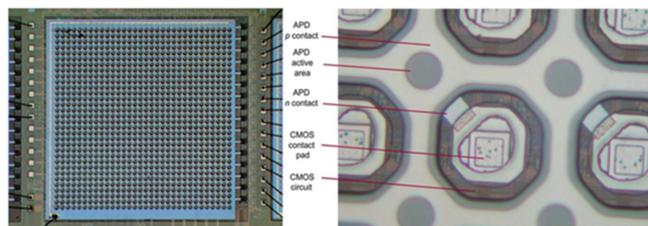


图6 混合集成 APD/CMOS 器件的显微照片^[18]

Fig. 6 Photomicrograph of hybrid integrated APD/CMOS device^[18]

2014年, 瑞士洛桑联邦理工大学报道了一种基于 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺的 202×96 像元 SPAD 阵列片上系统(system on chip, SOC)探测器^[24]。该芯片的核心由两个线性像素阵列组成: 第1个阵列用于执行场景的被动成像, 第2个阵列用于主动多回波 TOF 成像, SOC 还包括一个 64 通道 12 位 TDC, $768\ \text{kbit}$ SRAM 存储器。在强太阳背景光下以 $10\ \text{frame/s}$ 的速度在 $100\ \text{m}$ 范围内获得了实时、准确的距离图像, 分辨率为 $202\ \text{pixel} \times 96\ \text{pixel}$ 。图7a展示了其系统芯片架构; 图7b为探测器的芯片照片, 其中左半部分为数字信号处理(digital signal processing, DSP)电路, 右半部分为单光子雪崩二极管(single photon avalanche diode, SPAD)像元以及时间数字转换(time to digital converter, TDC)电路; 图7c最上面部分为颜色编码 TOF 距离成像, 中间部分为信号稳定性测量结果, 最下面为摄像头拍出的照片, 可以清晰辨别出图中的人物和车子。

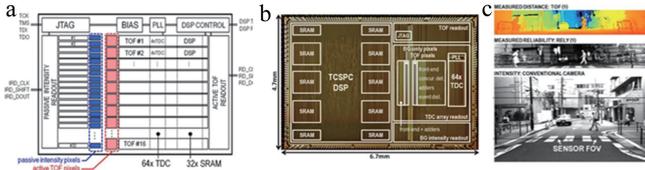


图 7 SOC 探测器^[24]
Fig. 7 SOC detector^[24]

2019 年,英国爱丁堡大学的 HUTCHINGS 等人报道了一种集成在 3 维叠层 90 nm 1P4M/40 nm 1P8M 工艺中的 256×256 SPAD 传感器(如图 8 所示)用于闪光探测、激光测距或高速直接 TOF 3 维成像^[25]。传感器底层由 64×64 个间距为 36.72 μm 的模块化光子处理单元组成,这些单元由共享的 4×4 个 SPAD 以 9.18 μm 的间距和 51% 的填充系数运行。

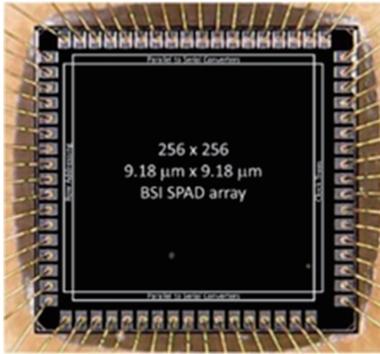


图 8 阵列照片^[25]
Fig. 8 Array photo^[25]

2020 年,美国 Acqubit 公司的 YUAN 等人开发了一种具有衬底去除结构的 GaAs 基 InGaP APD^[26],制作了 32×32 GM APD 阵列,并与 ROIC 进行了集成,芯片尺寸约为 3.75 mm×3.75 mm,比显微镜的正常视场(field of view, FOV)大。在室温下,在 50 μm 器件上测得的暗电流小于 10 pA。在 532 nm 处,防反(anti reflective, AR)增透膜器件的外部量子效率约为 54%。图 9 为其焦平面图片。

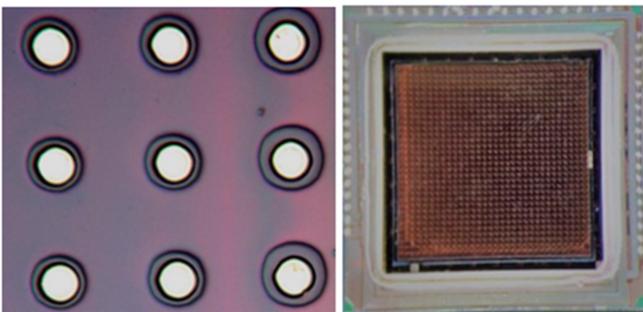


图 9 32×32 阵列和焦平面^[26]
Fig. 9 32×32 array and focal plane^[26]

2022 年,瑞士洛桑联邦理工学院的 ZHAO 等人提

出了一种基于标准 55 nm 单片集成(bipolar-CMOS-DMOS, BCD)技术的模拟 Si PMT,并且将 Si PMT 集成到带有时间相关单光子计数(time-correlated single photon counting, TCSPC)模块的 LiDAR 系统中^[27]。Si PMT 由 16×16 单光子雪崩二极管(SPAD)组成,尺寸为 0.29 mm×0.32 mm。每个 SPAD 单元由一个 3.3 V 的单片集成 MOS 管被动熄灭,在 5 V 偏置电压下测得的增益为 3.4×10⁵。在 3.3 V 偏置电压下,单光子计时分辨率为 185 ps,多光子计时分辨率为 120 ps。在室内环境光条件下,25 m 距离测量时的精度为 2 cm 和 2 mm。如图 10 所示,是在同轴扫描的情况下,128×256 和 256×512 分辨率的复杂场景的强度和深度图像。

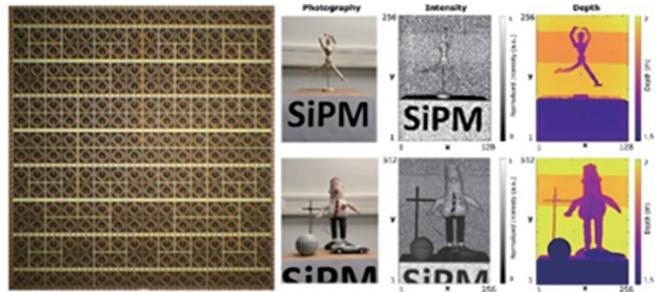


图 10 Si PMT 阵列图和深度强度图像^[27]

Fig. 10 Si PMT array diagram and depth intensity image^[27]

2 APD 阵列国内研究现状

2.1 LM APD 阵列研究现状

2010 年,电子科技大学将 4×4 个光纤耦合的离散 APD 用于闪光激光雷达^[28],探测范围为 1.5 km,测量精度为 15 cm。

2013 年,哈尔滨工业大学采用美国 Pacific Silicon Sensor 公司生产的 Si 基阵列 APD 探测器,设计了 8×8 的 LM APD 阵列激光雷达系统^[29],探测器像元数 8×8,像元面积 205 μm²。

2015 年,桂林理工大学提出了一种闪光激光雷达 GLiDAR-II,它采用了美国 Pacific Silicon Sensor 公司生产的 AD500-8TO52S2 的 5×5 光纤耦合的分立式硅基 APD^[30-31]。使用光纤耦合的 APD,可以有效地降低相邻 APD 的电串扰,并可以根据实际应用需求方便地增加 APD 的数量,光纤与雪崩光电二极管之间的光耦合效率高达 90%。APD 工作在线性模式,在 760 nm~910 nm 波长范围内量子效率大于 80%。GLiDAR-II 的视场角为 1.2°×1.2°,探测范围只有 20 m,测距精度为 5 cm。

2016 年,南京大学开发了一种新型的激光雷达系

统,该系统使用4个LM APD探测器^[32]。根据调制和多路复用技术,仅利用1×4个LM APD探测器即可实现每帧256个像素的检测,脉冲激光闪光激光雷达的横向分辨率约为15 cm,测距精度约为4 cm。

2018年,西南技术物理研究所研制了一种64×64 LM InGaAs/InP雪崩光电二极管阵列,与专用互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)集成电路通过In柱倒装互联工艺混合集成的方式形成了LM-APD-FPA器件^[33]。该阵列的最小探测功率为400 nW,读出电路的时间分辨率为1 ns,脉冲激光波长为1064 nm,脉宽为5 ns,单脉冲能量为100 mJ,重复频率为20 Hz,检测范围为1 km,精度为15 cm。

2018年,北京理工大学提出了一种受复眼和人眼启发的新型脉冲激光3维成像系统^[34-36],如图11所示。接收光学系统由18×30个微透镜组成,分布在曲面上,模拟复眼的大视场特征,整个视场达到52°。图中,FPGA(field-programmable gate array)是现场可编程门阵列,DOE(diffractive optical element)为衍射光学元件,NUMLA(non-uniform microlens array)为非均匀微透镜阵列。

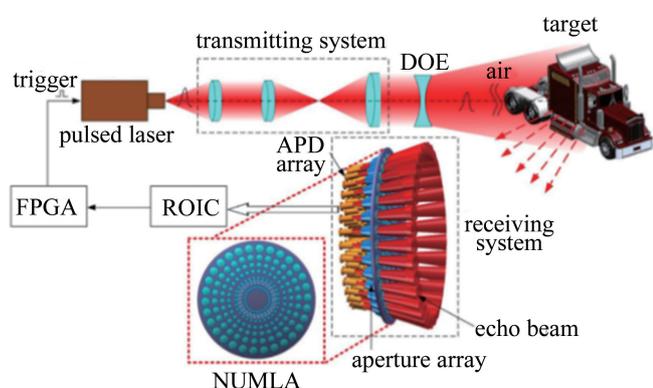


图11 北京理工大学研制的脉冲激光闪光激光雷达原理图^[34]

Fig. 11 Schematic diagram of pulse laser flash LiDAR developed by Beijing University of Technology^[34]

2020年,重庆光电技术研究所设计了128×2线性模式硅基雪崩光电二极管阵列^[37]。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LM 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。最小时间分辨率可达0.25 ns,APD焦平面探测器的非均匀性为7%,串扰为0.15%。

2.2 GM APD 阵列研究现状

2016年,哈尔滨工业大学研制的闪光激光雷达采用中国电子科技集团公司第四十四研究所研制出的32×32像元的InGaAsGm-APD焦平面探测器^[38]。脉冲激光波长为1570 nm,脉冲能量为2 mJ,脉冲宽度小于10 ns,测量范围距离可达3.9 km,帧速率为1 kHz。

2019年,中国电子科技集团公司第三十八研究所研制了一种基于64×64 InGaAs GM雪崩光电二极管阵列的闪光激光雷达^[39],其波长为1064 nm,读出电路的时间分辨率为2 ns。实现了对大约300 m外的目标进行成像。

目前国内对于Si PMT器件的研究报道比较少,2018年,华中科技大学基于0.18 μm标准CMOS工艺研制了Si PMT器件^[40];2020年,北京师范大学新器件实验室成功研制出微单元尺寸为15 μm、有效面积为9 mm²的外延电阻淬灭型硅光电倍增器^[41]。

3 国内外 APD 阵列代表指标的对比

表1和表2中对国内外LM APD阵列和GM APD阵列的指标进行了对比。国外对激光雷达的研究较早,在探测器技术方面有较多的技术储备,目前研究的方向主要是提高探测器规模和成像性能,并实现大面阵、小型化、多波段、高帧频及低功耗。在探测器技术研究方面,国内与国外仍然存在着一一定的差距,由于大规模的APD阵列探测器对各方面技术的要求高,在制作上更难实现,特别是由于半导体工艺的限制以及国

表1 国内外 LM APD 阵列指标对比

Table 1 Comparison of LM APD array indicators at home and abroad

	国外 ^[4]	国外 ^[6]	国外 ^[2]	国外 ^[13,15]	国内 ^[27]	国内 ^[32]	国内 ^[36]
年份	2004	2012	2012	2021	2010	2018	2020
波长	1570 nm	1500 nm	1570 nm	0.9 μm~4.3 μm	1064 nm	1064 nm	905 nm
材料	InGaAs	HgCdTe	HgCdTe	HgCdTe	—	InGaAs/InP	Si
阵列规模	128×128	256×256	320×256	2×8	4×4	64×64	128×2
探测距离	0.06 km~1.1 km	7 km~10 km	40 m	1 m~10 km	1.5 km	1 km	—
探测精度	15 cm	5 cm@1 km	11 cm	0.05 m	15 cm	15 cm	—
像元间距	—	—	—	64 μm	—	—	150 μm

表 2 国内外 GM APD 阵列指标对比
Table 2 Comparison of GM APD array indicators at home and abroad

	国外 ^[18]	国外 ^[19]	国外 ^[20-22]	国外 ^[25]	国外 ^[27]	国内 ^[38]	国内 ^[39]
年份	2002	2010	2015	2019	2022	2016	2019
波长	532 nm	1500 nm	—	671 nm	550 nm	1570 nm	1064 nm
材料	—	InP	—	—	Si	InGaAs	InGaAs
阵列规模	32×32	32×128	256×256	256×256	16×16	32×32	64×64
探测距离	500 m	3 km	3.5 km	50 m	25 m	3.9 km	300 m
探测精度	15 cm	0.3 m	—	—	2 cm/2 mm	0.12 m	—
像元间距	—	—	25 μm	9.18 μm	18.5 μm	—	—

外的技术封锁,国内研究单位多集中于线阵和小面阵探测的阶段,需要进一步推进大面阵 APD 阵列探测器研制,提高激光雷达的集成性,实现快速 3 维成像。

4 结束语

随着激光器和探测器技术的不断发展,成像激光雷达逐渐地向小面阵扫描、线阵推扫及面阵闪光成像发展,成像速度越来越快;随着光电探测技术的成熟,探测灵敏度越来越高,使得激光雷达的体积、重量、功率进一步减小^[42];这就要求探测器技术朝着增大阵列规模,减小像元间距,提高多功能集成度,丰富探测波段,超低功耗的方向发展。因为激光容易受到大气状况的干扰,现代探测技术的发展趋向于多种传感器的融合探测获取更丰富的目标信息,3 维成像趋向于主动多回波探测和被动成像相结合。

参 考 文 献

- [1] CHENG B T, DAI Q, XIE X M, *et al.* Research progress of single photon photodetectors [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(5): 601-609 (in Chinese).
程碑彤, 代千, 谢修敏, 等. 单光子光电探测器的研究进展[J]. *激光技术*, 2022, 46(5): 601-609.
- [2] BORNIOLE 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]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 061305.
- [3] ZAPPA F, TISA S, TOSI A, *et al.* Principles and features of single-photon avalanche diode arrays [J]. *Sensors & Actuators*, 2007, A140(1): 103-112.
- [4] STETTNER R, BAILEY H, RICHMOND R D. Eye-safe laser radar 3D imaging [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5421: 553992.
- [5] KAMERMAN G W. Compact 3D flash lidar video cameras and applications [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 7684: 768405.
- [6] JACK M, CHAPMAN G, EDWARDS J, *et al.* Advances in LADAR components and subsystems at raytheon [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2012, 8353: 83532F.
- [7] EPP C. Autonomous precision landing and hazard detection and avoidance technology [C]//ALHAT: Aerospace Conference 2007. New York, USA: IEEE, 2007: 32-37.
- [8] BECK J D, SCRITCHFIELD R, MITRA P, *et al.* Linear mode photon counting with the noiseless gain HgCdTe e-avalanche photodiode [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 81901-81905.
- [9] ITZLER M A, CAMPBELL J C, SUN X, *et al.* HgCdTe e-APD detector arrays with single photon sensitivity for space lidar applications [C]//SPIE Sensing Technology + Applications 2014. New York, USA: IEEE, 2014: 79-85.
- [10] BECK J, McCURDY J, SKOKAN M, *et al.* A highly sensitive multi-element HgCdTe e-APD detector for IPDA lidar applications [C]//SPIE Defense, Security, & Sensing 2013. New York, USA: IEEE, 2013: 45-48.
- [11] BECK J, WOODALL M, SCRITCHFIELD R, *et al.* Gated IR imaging with 128×128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(9): 1334-1343.
- [12] PARAHYBA V, BORNIOLE D, PERRIER R, *et al.* Time-of-flight calibration of an MCT-APD sensor for a flash imaging LiDAR system [C]//International Conference on Space Optics-ICSO 2018. New York, USA: IEEE, 2018: 104-112.
- [13] SUN X L, ABSHIRE J B, KRAINAK M A, *et al.* HgCdTe avalanche photodiode array detectors with single photon sensitivity and integrated detector cooler assemblies for space lidar applications [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(6): 67101-67103.
- [14] PRASAD N S, LIU Y, SUN F, *et al.* Advanced SWIR photon-sensing integrated circuit hetero-junction phototransistor based focal plane array for space applications [C]//Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVII 2020. New York, USA: IEEE, 2020: 62-85.
- [15] 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.
- [16] HEINRICHS R, AULL B F, MARINO R M, *et al.* Three-dimensional laser radar with APD arrays [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2001, 4377: 106-117.
- [17] LUDWIG D, KONGABLE A, KRYWICK S, *et al.* Identifying targets under trees: Jigsaw 3D lidar test results [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 5086: 16-26.
- [18] MARINO R M, STEPHENS T, HATCH R E, *et al.* A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: System and measurements [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 5086: 61-65.
- [19] VERGHESE S, MCINTOSH K A, LIAU Z L, *et al.* Arrays of 128×32 InP-based Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2009, 7320: 821875.
- [20] FIGER D F, LEE J, HANOLD B J, *et al.* A photon-counting detector for exoplanet missions-A [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011,

- 8151; 893655.
- [21] AULL B F, SCHUETTE D R, YOUNG D J, *et al.* A study of crosstalk in a MYM256 IMES 256MYM photon counting imager based on silicon Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2123-2132.
- [22] AULL B F, DUERR E K, FRECHETTE J P, *et al.* Large-format Geiger-mode avalanche photodiode arrays and readout circuits [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 24(2): 3800510.
- [23] FIGER D F, LEE J, HANOLD B J, *et al.* A photon-counting detector for exoplanet missions-B [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8151: 893656.
- [24] NICLASS C S, SOGA M, MATSUBARA H, *et al.* A 0.18 μm CMOS SoC for a 100 m range 10 frame/s 200 \times 96-pixel time-of-flight depth sensor [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2014, 49(1): 315-330.
- [25] HUTCHINGS S W, JOHNSTON N, GYONGY I, *et al.* A reconfigurable 3-D-stacked spad imager with in-pixel histogramming for flash lidar or high-speed time-of-flight imaging [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(11): 2947-2956.
- [26] YUAN P. High performance InGaP Geiger-mode avalanche photodiodes (Conference Presentation) [C]//*Laser Radar Technology and Applications XXV 2020*. New York, USA: IEEE, 2020: 107-122.
- [27] ZHAO J X, MILANESE T, GRAMUGLIA F, *et al.* On analog silicon photomultipliers in standard 55 nm BCD technology for LiDAR applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 28(5): 3804010.
- [28] WANG Y L. Research on 3-D imaging lidar signal processing system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 75-78 (in Chinese).
王颖麟. 3-D 成像激光雷达信号处理系统的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 75-78.
- [29] ZHU J H. Analysis and experimental research on the nonuniformity of array APD non scanning lidar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 17-21 (in Chinese).
朱静浩. 阵列 APD 无扫描激光雷达非均匀性的分析与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 17-21.
- [30] ZHOU G, XIANG Z, YANG J, *et al.* Flash LiDAR sensor using fiber coupled APDs [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9): 1-5.
- [31] ZHOU G, LI M, JIANG L, *et al.* 3D image generation with laser radar based on APD arrays [C]//*Geoscience & Remote Sensing Symposium 2015*. New York, USA: IEEE, 2015: 32-45.
- [32] XU F, WANG Y, LI F. Pixel multiplexing technique for real-time three-dimensional-imaging laser detection and ranging system using four linear-mode avalanche photodiodes [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(3): 141116-141123.
- [33] LI X, SHI Z, DAI Q, *et al.* 64 \times 64 InGaAs/InP 3D imaging laser focal plane detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 107-111 (in Chinese).
李潇, 石柱, 代千, 等. 64 \times 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.
- [34] CHENG Y, CAO J, ZHANG F, *et al.* Design and modeling of pulsed-laser three-dimensional imaging system inspired by compound and human hybrid eye [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17164.
- [35] CHENG Y, CAO J, ZHANG Y, *et al.* Review of state-of-art artificial compound eye imaging systems [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(3): 031002.
- [36] CHENG Y, CAO J, CUI H, *et al.* Bio-inspired lidar imaging with a non-uniform curved linear array receiving system [C]//*Conference on Optical Sensing and Imaging Technology 2020*. New York, USA: IEEE, 2020: 45-48.
- [37] WANG Y, DENG G P, MA H P, *et al.* For 3D imaging 128 \times 2 linear mode APD focal plane detector design [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(6): 4-8 (in Chinese).
王颖, 邓光平, 马华平, 等. 三维成像用 128 \times 2 线性模式 APD 焦平面探测器设计 [J]. *半导体光电*, 2020, 41(6): 4-8.
- [38] SUN J F, JIANG P, ZHANG X Ch, *et al.* Experimental research of 32 \times 32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206006 (in Chinese).
孙剑峰, 姜鹏, 张秀川, 等. 32 \times 32 面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1206006.
- [39] GE P, GUO J J, SHANG Zh. Laser 3D imaging based on area array single photon detector [J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2019(16): 145-146 (in Chinese).
葛鹏, 郭静菁, 尚震. 基于面阵单光子探测器的激光三维成像 [J]. *电子技术与软件工程*, 2019(16): 145-146.
- [40] ZHANG X. 0.18 μm standard CMOS process silicon photoelectric multiplier development [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 37-45 (in Chinese).
张玺. 0.18 μm 标准 CMOS 工艺硅光电倍增器研制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 37-45.
- [41] LIU H M, LONG J Y, DAI L, *et al.* Large dynamic range epitaxial resistance quenched silicon photoelectric multiplier [J]. *Optical Precision Engineering*, 2020, 28(3): 535-541 (in Chinese).
刘红敏, 龙金燕, 代雷, 等. 大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 535-541.
- [42] LIU B, YU Y, JIANG S. Research progress of lidar detection and 3D imaging [J]. *Opo-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 13-17 (in Chinese).
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): 13-17.