文章编号:1001-5078(2018)01-0010-08

·综述与评论·

APD 阵列探测器在自由空间光通信上的应用研究

李 千^{1,2}, 吴志勇¹, 高世杰¹, 陈云善¹, 吴佳彬¹
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:自由空间光通信(free space optical communication, FSO)技术是通信前沿技术之一,雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)阵列探测器以其高灵敏度、高带宽、低噪声的优势应用于 FSO 系统,成为国内外研究热点。本文分析了 FSO 对 APD 阵列探测器的性能需求,回顾了国内外近年来用于无线光通信的 APD 阵列的研究现状,其中重点介绍了美国林肯实验室以及海军实验室的研究成果,最后对 APD 阵列探测器在 FSO 应用的发展方向进行了预测与总结。

关键词:雪崩二极管;APD 阵列;自由空间光通信 中图分类号:TN929.12 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.002

Application of APD array detector in free space optical communication

LI Qian^{1,2}, WU Zhi-yong¹, GAO Shi-jie¹, CHEN Yun-shan¹, WU Jia-bin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mehcanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Free space optical communication technology is one of the cutting edge technology in communication. APD array detector has been widely applied to the FSO system because of its high sensitivity, high bandwidth and low noise, so it becomes a research hotspot at home and abroad. The performance requirements of FSO for APD array detectors are analyzed, and the research status of APD arrays for wireless optical communication in recent years is reviewed. The research results of Lincoln Laboratory and Naval Research Laboratory are introduced. Finally, the development directions of APD array detector in FSO are forecasted and summarized.

Key words: avalanche diode; APD array; free space optical communication

1 引 言

FSO 技术结合了无线通信与光纤通信的优点, 因具有保密性高、速率快等优势而受到人们的广 泛关注^[1]。APD 是一种性能优越的光电探测器, 它的灵敏度远远高于 PIN 光电二极管、CCD 等器 件,但单个 APD 难以做到同时兼顾光敏面面积与 上升时间两项指标,这限制了它进一步的应用。 近年来,人们开始研制由多个 APD 组成的阵列探 测器,并将其应用于 FSO 中,这对于减小 FSO 系统 的重量体积、提高系统灵敏度等都有重要意义。 目前 APD 阵列的研制也面临一些困难,例如在阵 列达到一定规模后存在难以保证 APD 性能的均一

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11403064)资助。

作者简介:李 千(1993 -),男,博士研究生,主要研究方向为无线光通信。E-mail:sdwhlq1993@163.com 收稿日期:2017-05-17

性、与之搭配的读出电路设计也十分复杂等问题。 本文结合 APD 探测器的结构,分析了 FSO 系统对 接收器性能的需求,介绍了国内外将 APD 阵列应 用于 FSO 系统所做的研究工作,并对其发展趋势 进行了展望。

2 典型 APD 阵列简述

APD 阵列并不只是简单地将 APD 拼接在一起,而是将门电路、APD 称位寄存器等部件有机地结合为一个整体。目前 APD 阵列的集成方式有两种,分别是混合集成技术和单片集成技术^[2]。单片集成技术是指将 APD 与控制电路作为一个整体同时加工,该技术的主要代表是意大利的米兰工业大学和瑞士的洛桑工业大学。混合集成技术是指将 APD 与控制电路分别进行加工,最后通过桥接技术将二者集成在一起,该技术的典型代表是美国的林肯实验室。图1 与图2 分别为利用单片集成技术和混合集成技术集成后的 APD 阵列显微照片。





Fig. 1 Photomicrograph of the same bridge-bonded APD/CMOS device



图 2 混合集成 APD 阵列照片 Fig. 2 Photomicrograph of the Hybrid integrated APD device

3 FSO 对 APD 阵列探测器的性能需求

FSO 系统中的探测器主要有两类:一类是位置 探测器,负责感知目标的位置信息;另一类是信息 接收器,负责接收信息。以往这两类探测器都采 用 PIN 管,因为它结构简单、噪声可控,但它的灵 敏度不是很高。随着技术的发展,APD 逐渐解决 了自身噪声过大的问题,开始在 FSO 系统中逐渐 取代 PIN 管。

APD 作为通信信号探测器时,需要特别的注 重 APD 的响应速度,也就是上升时间这个参数。 APD 的上升时间限定了其响应带宽,而 APD 的光 敏面尺寸与上升时间呈反比关系,选择光敏面的 尺寸大小需要折中考虑^[3]。因此通信接收器一般 选用低电容的、具有较小的光敏面面积的 APD 以 使得带宽和灵敏度最大化,而位置探测器则要求 探测单元具有较大光敏面面积且具有位置感知能 力。这样就造成现有的位置探测器在作为数据接 收器时不能提供足够的带宽以及灵敏度,而数据 接收器用作位置探测器时则缺少光敏面面积及空 间分辨力。随着近年来由多个 APD 组成的阵列探 测器开始应用于 FSO 系统中,人们发现这种由多 个较小的单元组成的 APD 探测器阵列在提供了足 够的光敏面面积同时还保持了高带宽、高灵敏度, 因此它具备同时充当 FSO 系统数据接收器与位置 探测器的潜力。

采用 APD 阵列探测器的 FSO 探测器具有许多 独特的优势:

(1)能实现跟踪与通信一体化,降低 FSO 系统 光路设计的复杂度。由于不用进行分光,能够大 大提高进光量,因此不需要使用大口径的光学天 线,这将显著降低系统的体积与重量,这对于 FSO 通信在深空探测以及各种移动终端的应用来说尤 为重要。

(2)随着 APD 阵列规模的不断拓展,阵列的光 敏面面积也随之扩大,这有利于降低对粗跟踪系统 的精度要求,降低 FSO 系统的成本。

(3) 阵列 APD 能够有效地降低盖革模式 APD 探测概率极大值的漂移,对于强背景噪声的探测环境,阵列 APD 能够提高信号回波探测的锐度,有利于信号在强背景噪声中的识别。

4 国内外用于无线光通信的 APD 阵列发展现状

国内外很多机构都在进行该领域的研究,美国的麻省理工学院林肯实验室以及海军实验室和法国 微电子研发机构 CEA/LETI 便是其中的典型代表。

4.1 美国麻省理工学院林肯实验室研究情况

麻省理工学院(MIT)林肯实验室是最早研究该 领域的几家机构之一,他们初期的研究是围绕着激 光雷达系统来展开的,作为激光雷达系统核心部件 之一的 APD 阵列在这个过程中得到了很大的发展, 表1展示了其主要成果。林肯实验室随后进行了对 APD 阵列应用在 FSO 通信的研究。

表1 林肯实验室 APD 阵列主要成果

Tab. 1 Lincoln laboratory main

achievements in APD array

时 间	成 果	阵列规模
1998年	首次运用混合集成技术将 APD 阵列与 处理电路集成在一起	4 × 4
2002 年	开发出第一代激光雷达系统 Gen-I	4 × 4
2002 年	成功将 Gen – I 微型化,研制出 Gen – II	32 ×32
2003 年	研制了更加坚固和紧凑型的 Gen – III 系统	32 ×32
2009 年	开发了一种对紫外波段响应的盖革模式 APD 器件	16 × 16
2011年	继续扩大 APD 的阵列规模	256 × 256

4.1.1 林肯分立光学接收架构(LDORA)

林肯实验室于 2004 年提出一种新型的激光通 信接收机架构,他们称其为林肯分立光学接收架构 (the Lincoln Distributed Optical Receive Architecture, LDORA)。这种架构包括一个集成的望远镜阵列, 其中的每个望远镜都会配备一个盖革模式 APD 阵 列,还会配备快速反射镜来进行瞄准与跟踪^[4]。望 远镜阵列既可以像图 3 那样共同集成在一个固定结 构上,还可以像图 4 那样分立式集成。如果采用图 4 分立式的集成方式,还需要用特殊的方式来进行 同步,为此,林肯实验室设计了如图 5 所示的同步装 置。通过计算每个望远镜的时间偏差,测量量可以 被重新同步,并且这种时间偏差可以通过仔细的测 量阵列并计算动态变化的瞄准角度来进行脱机的 预测。



图 3 集成在固定结构上的望远镜阵列 Fig. 3 Telescopes array mounted on single structure



图 4 独立集成的望远镜 Fig. 4 Telescopes on individual mounts



图 5 LDORA 架构

Fig. 5 LDORA Architecture

LDORA 架构具有许多优点:

(1)由于其本身独特的架构,使用者可以灵活 调整望远镜的尺寸与数量,在保证性能的基础上大 大降低成本。

(2)如果单个望远镜出现故障,剩余的可以继续工作。事实上,在容量足够的情况下,一个阵列可以同时执行多个任务。

(3)大口径的望远镜通常不能在白天工作,因 为这会对结构造成损坏。小口径的望远镜阵列则不 存在这个问题。

(4)体积重量较小,可以安装在卡车上,这可以 大大拓展其应用范围。

(5)应用不仅仅局限于陆地,LDORA 阵列可以 被装载在卫星上。

4.1.2 硅基盖革模式的 APD 阵列对在 1550 nm 波 段光子的探测

林肯实验室还展开了对硅基盖革模式的 APD 阵列(Si GM-APDs)的研究。Si GM-APDs 作为光子 计数接收器具有许多理想的特性,包括单光子探测 效率高,冷却时间短等,然而其能探测到的的光子波 长范围仅为 500~800 nm,不能探测到近红外的光 子。2007年,他们提出了一种如图 6 所示的解决方 案,将一个由周期性极化铌酸锂(PPLN)波导管构成 的波长转换器与 Si GM-APDs 组合起来^[5]。通过这 种方法他们实现了用 Si GM-APDs 对在 1550 nm 波 段光子的探测,使用单个 APD 在速率为 5.5 Mb/s 时达到了 1.4 光子/比特的灵敏度,在速率为 22 Mb/s 时达到了 3.5 光子/比特的灵敏度,随后又使 用 5 × 5 APD 阵列在速率为 78 Mb/s 时达到了 4 光 子/比特的灵敏度。这对于拓展 Si GM-APDs 阵列 的应用范围具有重要意义。



Fig. 6 Wavelength upconverter based on periodically-poled lithium-niobate(PPLN)

4.1.3 基于 GM-APD 的新型激光通信与空间追踪系统

2016年,林肯实验室研制了一套基于 GM-APD 的新型激光通信与空间追踪系统,其使用的 APD 阵列拓展到了 32×32 共 1024 个单元,阵列的有效区域面积为 100 μm²。如图 7 所示,他们采用了一种带热电冷却器的气密封装方式将阵列、微透镜以及集成读出电路(ROIC)都被结合在一起。如此多的单元数量能够在大气湍流的干扰下维持很高的通讯速率。在速率为 78.8 Mb/s 时达到了 1.34 光子/比特的灵敏度,在速率为 19.4 Mb/s 时达到了 0.95 光子/比特的灵敏度^[6]。另外,阵列可以记录每次入射光子的空间坐标,通过计算入射光子分布的几何中心,就可以确定探测到的光子的入射角。



图 7 用带热电冷却器的气密封装方式将 GM - APD 阵列和微透镜和 ROIC 组装起来

Fig. 7 Assembly of GM – APD array with microlens and custom ROIC into a hermetically scaled package with thermo-electric cooling

这个探测阵列所具有的一个独特的装置就是它 的 ROIC。传统探测阵列有两种工作模式:同步模式 或是异步模式。林肯实验室通过研制一种新型 ROIC 架构融合了这两种模式的优点,使得入射光子的空间 与时间信息都能被持续的记录下来,这就让这种阵列 具备了同时充当通信接收器和空间追踪器的能力。

由于这个 GM - APD 阵列还处于研究阶段,因 此难以保证每个单元的均一性,这就造成了在施加 了-30.6 V 的偏置电压后,阵列中的一些单元会持 续雪崩。这些问题单元会大大增加系统的本底噪 声,对周围的单元产生串扰,对整个阵列的探测灵敏 度造成显著的不利影响。

林肯实验室发现这个问题可以通过 ROIC 对于 偏置电压的管理来解决,通过对暗计数的预处理来 生成一个包含最有问题单元的掩模,移除有问题的 单元的偏置电压来使它们失效。图 8 展示了这样做 的结果,暗计数值前 5% 的问题单元被 ROIC 剔除, 得到的结果十分理想。





4.2 美国海军实验室研究情况

美国海军实验室(NRL)在这个领域也颇有建树,不同于林肯实验室,他们没有选择盖革模式的APD,而是着眼于改进工作于线性模式的InGaAsAPD,这种APD工作波段为1550 nm,这既有利于用 其构建工作于人眼安全波长的系统,也有利于充分利用现有标准的器件。

4.2.1 新型 APD 的研制

传统的 InGaAs APD 存在一个 InGaAs 光电探测 区和一个 InP 雪崩区。不同于 Si – APD, InP 中的被 激发的电子与空穴数目几乎相等, 它的离子化率 *k* =0.5, 这就造成了这种 APD 的增益越高, 额外的噪 声也就越大。NRL 在 2005 年开始与 Optogration 公司以及弗吉尼亚大学合作研发一种拥有更好噪声特性的 APD。如图 9 所示,他们采用更薄的以InAlAs为材料的雪崩区,这使得其 k 值降低到 0.2,其相较于 InP APD 的灵敏度提高了 4 dB。NRL 使用直径为 200 μ m 的这种 APD 在速率为 622 Mbps 时达到了 – 42 dBm 的灵敏度^[7]。



图 9 InAlAs/InGaAs APD 阵列的外延结构 Fig. 9 Epitaxial structure of the InAlAs/InGaAs APD arrays

在 2016 年,他们又研制了更加先进的 impact ionization engineered(I^2E) APD。如图 10 所示, I^2E 器件在倍增区域实现了多周期的操作去加强期望载 流子的离子化同时抑制其他的离子化。这样,从高 电位区域发射出来的电子会具有很高的离子化率, 而从低电位发射的空穴就会具有很低的离子化率。 因为这个进程将会在倍增区重复进行许多次,这样 就会在产生更多可以预知的离子化的同时大大降低 了额外的噪声。目前,Optogration 制造的三周期的 I^2E 器件的 *k* 可以达到 0.1,这使得其灵敏度又提升 了 2~3 dB^[8]。



图 10 I²E APD 阵列的外延结构

Fig. 10 Epitaxial structure of the $\mathrm{I}^{2}\,\mathrm{E}$ APD arrays

4.2.2 APD 阵列结构及算法研究

除了进行对 APD 器件本身的研究,NRL 还针对 APD 阵列结构及算法展开了研究。他们在 2008 年 提出一种 2×2 的 APD 阵列结构^[9]。如图 11 所示, 阵列中每个正方形的单元同时作为数据接收器与位 置探测器。每个单元都具有 100 µm×100 µm 的光 敏面面积,带宽高达 2.5 Gbps。



图 11 2×2 APD 阵列结构 Fig. 11 2×2 APD array structure

NRL 为其设计的判决策略有三种:"sum2"、 "sum all"、"winner takes all"。NRL 对这三种策略 进行了实验室测试与外场测试。实验室测试是验证 每种判决策略在不同的照射条件下的信噪比变化。 图 12 是测试结果,结果显示:winner takes all 策略在 只有一个单元被照亮时的信噪比最高,Sum 2 策略 在有两个单元被照亮时信噪比最高,sum 4 策略在 四个单元全被照亮时信噪比最高。



图 12 不同光照配置下的算法表现 Fig. 12 algorithm performance withdifferent

外场测试是用 1.55 μm FSO 链路来对 APD 阵列和判决电路进行测试,测试框图如 13 所示。 图 14 显示了 APD 接收的各个信道的信号的能量 大小。可以看出,能量随着时间在各个信道之间 来回移动,可以推测这是由于大气湍流所造成的 影响。因此在这种情况下选用 winner takes all 策 略的效果与 sum all 相比较差。图 15 是采用 sum all 策略得到的信号,显然采用这种策略能在大气 湍流影响的情况下显著地提升接收信号的信 噪比。



图 13 外场测试框图

Fig. 13 Field test diagram pixel illumination configuration



图 14 通道信号强度/时间图 Fig. 14 Channel signal level vs. time





图 16 显示了外场测试的第二天 APD 接收的各个信道的信号。由于没有大气湍流的影响,各个信 道的信号基本相同,这时采用 sum all 的策略效果会 不及 winner takes all 策略,因为这样会混入其他信 道信号的噪声而降低信噪比。

2014年,NRL研制出了一种五单元的 APD 阵 列,结构如图 17 所示。与上文 2 × 2 的阵列不同的 是,这种 APD 阵列只采用中央的单元来进行数据接 收,这样就避免了信号合并带来的噪声污染。研究 结果显示,其对入射光斑的面积也有一定要求。如 果四周单元的入射能量不够,就会影响位置探测的 表现,若入射光斑的面积远大于中央接收单元的面 积,又会损失信号接收的效率^[10]。最终采用的光斑 面积比中间接收单元的稍大一点,直径大约为 150 μm。



图 16 在无大气湍流情况下接受的数据

Fig. 16 Data taken in relatively calm atmospheric conditions



图 17 五单元 APD 阵列的显微照片 Fig. 17 Micrograph of five element APD array

4.3 法国微电子研发机构 CEA/LETI 研究情况

HgCdTe APD 探测器阵列是 20 世纪 90 年代 新开发出的 APD 探测器,它具有独特的能带结构, 离子化率 k 值甚至可以达到 1 或 0,理论上可以完 全消除噪声,此外它还具有极高灵敏度和响应速 度,可制成大面阵,其探测响应截止波长可调等优 良特性。

2011 年,法国 CEA/LETI 和 DEFIR 实验室研制 了一种具备主动和被动成像能力的 HgCdTe APD 三 维闪光激光雷达,阵列大小为 320 × 256^[11]。2015 年 CEA/LETI 开始探索 HgCdTe APD 探测器阵列在 FSO 系统中的应用^[12]。

4.4 国内研究机构研究情况

我国在此领域的研究开展得较晚,主要研究 机构有哈尔滨工业大学、东南大学、中科院长春 光机所等。表2列举了这些科研机构的主要研 究成果。 表2 国内机构主要成果

Tab. 2 Main results of domestic institutions

时间	机构名称	主要成果
2008年	南京理工大学	验证了将2×2 APD 阵列作为激光测距接收器的可行性。
2010年	电子科技大学	王颖鳞设计了由 4 × 4 APD 阵列组成的激光雷达,进行了验证阵列雷达可行性的相关实验 ^[13] 。
2013 年	哈尔滨工业大学	张勇设计了一种 5×5 的阵列 APD 探测器,工作波长为 1064nm,信号处理电路采用 25 路并行的电路设计。系统带宽为 200MHz,增益为 40d B,输出信号的抖动小于 2ns,实验显示系统测距精度为 0.8m ^[14] 。
2014 年	中国科学院长春 光学精密机械 与物理研究所	王飞等人研制了8 × 8 单元的激光三维成像接收机。接收机采用线性模式 APD 阵列,设计了模拟信号放大、 阈值处理将回波光信号转换为数字信号后,利用 FPCA 设计实现 64 通道高精度阵列计时系统。经测试 FPGA 计时子系统的时间分辨率优于 140 ps,三维成像系统整体距离分辨率在 0.2 m 左右 ^[15] 。
2015 年	中国科学院 云南天文台	翟东升等人结合卫星激光测距的特点,模拟在不同背景噪声与回波强度时的卫星激光测距的探测效果,为今后 G-APDs 在测距系统的使用提供相应的理论支持 ^[16] 。
2015 年	东南大学	傅胡叶等人设计了一种新型的阵列型传感读出电路,可与 InGaAs APD 64 × 64 阵列混合集成,实现对远距离目标的主动三维成像 ^[17] 。

5 发展趋势

自从 1998 年林肯实验室利用混合集成方式首次 制成了 4×4 的 APD 阵列以后,西方发达国家意识到 了 APD 阵列的使用将会给 FSO 通信及激光主动探测 领域带来巨大的变革,美、英、法等国纷纷开展了对此 的研究。林肯实验室研究重点是盖革模式的 APD 阵 列,他们提出了新型的激光通信接收机架构,拓展了 APD 阵列的探测波长范围,随后研制了一套基于 GM-APD 的新型激光通信与空间追踪系统。美国海军实 验室则立足于线性模式 APD,改进结构,研发出新型 的 APD 器件,接着针对 APD 阵列结构及算法展开了 研究。法国 CEA/LETI 则选择了新型的 HgCdTe APD 作为 FSO 以及激光雷达的核心部件。

我国近年来有越来越多的科研机构开始从事该 领域的研究,例如东南大学专注于 APD 阵列读出电 路的研究,哈工大设计了 APD 阵列探测器,上海光 机所以及长春光机所进行了激光雷达的研制,但我 国研制的 APD 阵列与国外相比灵敏度不高、阵列规 模较小,并且暂时还没有机构从事将 APD 阵列探测 器应用于 FSO 通信的研究。

综上所述,APD 阵列探测器在自由空间光通信 上应用的发展趋势如下:

(1) APD 性能的继续提升。研究如何通过改进 材料与结构等方式进一步降低 APD 的噪声,提高灵 敏度,提高带宽仍是未来研究的目标,这也是构建高 水准 APD 阵列的基础。

(2)线性化。盖革模式的 APD 阵列技术已经逐 渐发展成熟,但盖革模式 APD 探测器存在重要技术 限制:第一,雪崩击穿后需要复位时间;第二,盖革模 式的探测器存在高虚警率问题,探测器存在对背景光 子计数或探测器的暗计数率;线性模式的 APD 探测 器则无需恢复时间,并且探测器可区分杂散辐射和信 号光子,其主要缺陷在于需要复杂的控制电路以及功 耗问题。随着技术的发展,工作于线性模式的 APD 阵列的功耗问题逐步得到解决,预计线性模式 APD 探测器也会成为 FSO 探测器的重要发展方向。

(3) 阵列化。APD 阵列从最初的 2 × 2 发展到 目前的 320 × 256, 未来阵列规模还会继续扩大。阵 列化不仅对解决实际应用中遇到的大气湍流等问题 很有帮助, APD 阵列化后还会具有探测位置的能 力, 未来可以同时充当 FSO 系统的数据接收器与位 置探测器, 这将大大简化 FSO 系统的光学设计, 降 低系统的体积与重量。

6 结 语

本文分析了 FSO 对 APD 阵列探测器的性能需 求,回顾了国内外近年来用于 FSO 的 APD 阵列的研 究现状,对 APD 阵列探测器在 FSO 应用的发展方向 进行了预测与总结。APD 阵列探测器以其独特的 优势在 FSO 系统中扮演着越来越重要的角色,受到 了西方发达国家的高度重视,他们已经率先对其进 行了一系列的研究。可以看出,国外科研机构的研 究基本都是遵循着器件本体研究 - 阵列结构设计 -应用算法研究的轨迹进行的。反观国内,从事器件 本体研究的机构较少,大多都热衷于直接购买进口 器件来研究应用算法。而事实上由于国外的封锁, 我们往往不能得到高性能、大规模的 APD 阵列,这 极大地限制了我国在该领域研究的发展。目前需要 国家加大在器件本体研究方面的投入,以尽快研制 出先进的 APD 器件,力争使我国在 FSO 领域快速赶 上发达国家的脚步。

参考文献:

- [1] WANG Jia, YU Xin. Free-space optical communication's current situation and development trend [J]. Optical Technique, 2005, 31(2):260-265. (in Chinese) 王佳, 俞信. 自由空间光通信技术的研究现状和发展 方向综述[J]. 光学技术, 2005, 31(2):260-265.
- [2] ZHAO Hongli, FAN Youchen, SUN Huayan, et al. Review about 3D radar system based on Geiger-mode APD array
 [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10):1083 1088..(in Chinese)
 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.

- [3] LIU Shihui. Resarch of military laser communications system based on QD for simultaneous communications an tracking[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese) 刘仕辉. 基于 QD 的通信与跟踪复合式军用激光通信系 统研究[D]. 长春:长春理工大学, 2014.
- [4] Don M Boroson, Roy S Bondurant, Daniel V Murphy. LDORA: a novel laser communications receiver array architecture [C]. Proc. SPIE, 2004, 5338:56-64.
- [5] M E Grein, L E Elgina, B S Robinsona, et al. Efficient communication at telecom wavelengths using wavelengthconversion and silicon photon-counting detectors [C]. Proc. SPIE, 2007, 6709:670910.
- [6] Timothy M Yarnall, Benjamin W Horkley, Ajay S Garg, et al. Demonstration of lasercom and spatial tracking with a siliconGeiger-Mode APD array [C]. Proc. SPIE, 2016, 9739:97390N.
- [7] MIKE S Ferraro, William R Clark, William S Rabinovich, et al. InAlAs/InGaAs avalanche photodiode arrays forfree space optical communication [J]. Applied Optics, 2015,54(31):F182 - F188.
- [8] Mike S Ferraro, William S Rabinovich, William R Clark, et al. Impact-ionization-engineered avalanche photodiode arrays for freespace optical communication [J]. Opt. Eng. 2016,55(11):111609.

- [9] Mike S Ferraro, William S Rabinovich, William R Clark, et al. Large area adaptive avalanche photodetectorarrays forfree-spaceoptical communication [C]. Proc. SPIE, 2008,7091;70910J.
- [10] Mike S Ferraro, William S Rabinovich, William R Clark, et al. Integration of a concentric five element InAlAs/In-GaAs avalanchephotodiode array in a stabilized bi-static optical assembly[C]. Proc. SPIE, 2014, 9080;90801D.
- [11] Borniol E, Rothman J, Guellec F, et al. Activethree-dimensional and thermal imaging with a 30 μm pitch 320 × 256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array[J]. Opt. Eng. ,2012,51(6):06305.
- [12] J Rothman, G Lasfargues, J Abergel. HgCd Te APDs for free space optical communications [C]. Proc. SPIE, 2015, 9647:96470N.
- [13] WAMG Yinglin. Research on 3-D imaging laser radar signal processing system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (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.

- [14] ZHANG Yong, CAO Xibin, WU Long, et al. Experimental study on laser imaging system of small area block scan[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8):1-7. (in Chinese) 张勇,曹喜滨,吴龙,等. 小面阵块扫描激光成像系统 实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8):1-7.
- [15] WANG Fei. Research progress in focal plane array for real-timelaser three dimensional imaging. Research progress in focal plane array for real-timelaser three dimensional imaging[J]. Chinese Optics, 2013,6(3):298 - 305. (in Chinese)

王飞.实时激光三维成像焦平面阵列研究进展[J].中国光学,2013,6(3):298-305.

- [16] ZHAI Dongsheng, TANG Rufeng, HUANG Kai, et al. Analysis on detection performance of satellite laser eanging based on Geiger mode APD arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6):0608007. (in Chinese)
 翟东升,汤儒峰,黄凯等. 基于 G-APD 阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J].中国激光, 2015, 42 (6):0608007.
- [17] FU Huye. The design of fully intergrated readout circuit based on Gm - APD 64 × 64 arrays[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese) 傅胡叶. Gm-APD 64 × 64 阵列型全集成传感读出电路 设计[D]. 南京:东南大学, 2015.