

## 64×64 InGaAs/InP 三维成像激光焦平面探测器

李 潇,石柱,代 千,覃文治,寇先果,袁 鑒,刘期斌,黄海华

(西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

**摘 要:** 针对 900~1 700 nm 波长无扫描激光三维成像雷达的需求,研制了一种规模为 64×64 的线性模式雪崩焦平面阵列(LM-APD-FPA),它由 InGaAs/InP 雪崩光电二极管阵列与 CMOS 专用读出电路(ASIC)组成。该器件采用飞行时间(TOF)测距的方式工作,APD 光敏芯片将脉冲激光信号转化成脉冲光电流,读出电路对其进行放大、阈值比较后实现激光探测并在每个单元获取光脉冲的飞行时间,将其转化成二进制编码信号后串行输出。测试结果表明,64×64 LM-APD-FPA 有效像元最小可探测光功率值约为 400 nW,时间分辨率为 1 ns。用该探测器在激光雷达系统上实现了无扫描单脉冲激光三维成像,表明了线性模式激光焦平面探测器可用于激光三维成像领域。

**关键词:** 焦平面阵列; 线性模式; 铟镓砷; 飞行时间测距; 三维成像

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0806004

## 64×64 InGaAs/InP 3D imaging laser focal plane detector

Li Xiao, Shi Zhu, Dai Qian, Qin Wenzhi, Kou Xianguo, Yuan Liu, Liu Qibin, Huang Haihua

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** For the requirement of non-scanning 3D imaging lidar using the wavelength from 900–1 700 nm, a 64×64 linear-mode avalanche photodiode focal plane array (LM-APD-FPA) was proposed, which was composed of InGaAs/InP avalanche photodiode array and CMOS read-out circuitry (ASIC). The working mode of this device was time-of-flight(TOF). APD converted the laser pulse into pulse current which was amplified and thresholded by read-out circuitry, then the laser detection was realized after the comparison of the threshold value, the laser pulse flight time of every pixel was obtained and being converted to binary codes for serial output. Testing results show that the minimal detectable power of 64×64 LM-APD-FPA is 400 nW, time resolution is 1 ns. This device is used in lidar system and realizes non-scanning single-pulse laser 3D imaging, indicating that the linear-mode laser focal plane array is useful in the field of laser 3D imaging.

**Key words:** focal plane array; linear mode; InGaAs; time of flight ranging; 3D imaging

收稿日期:2018-03-05; 修订日期:2018-04-03

基金项目:总装备部十二五预研项目

作者简介:李潇(1979-),男,研究员,博士,主要从事三维成像激光焦平面探测器方面的研究。Email:13618085492@139.com

## 0 引言

非扫描三维激光主动成像是一项正在迅速发展的高新技术,目前有多种传感器,其中基于 APD 阵列的焦平面探测器是国内外的研究热点,按照 APD 的工作偏置电压不同,分为线性模式和盖革两种体制,其中线性体制的特点是可以对高速运动目标实现单脉冲瞬时成像,具备恢复时间短、信号处理难度小、容易扩展规模等优点<sup>[1]</sup>,它在主动激光成像制导、障碍规避、目标跟踪<sup>[2]</sup>和三维地形测绘等领域有广阔的应用前景。

InGaAs/InP 雪崩光电二极管具有在 900~1 700 nm 波段量子效率高、响应速度快、无需超低温工作及技术成熟等特点。美国林肯实验室<sup>[3]</sup>、波音公司<sup>[4]</sup>、普林斯顿微波公司<sup>[5]</sup>、美国先进概念技术公司<sup>[6]</sup>等研究机构近年来在该领域开展了大量研究,阵列规模已达到 265×256 以上,朝着大面阵<sup>[7]</sup>、高灵敏度、高分辨率及集成信号处理电路的智能化方向发展。国内主要有西南技术物理研究所<sup>[3-10]</sup>、中国电子科技集团公司第四十四研究所<sup>[9]</sup>、中国科学院上海技术物理研究所<sup>[10]</sup>等科研单位在从事相关研究。

文中报道了 InGaAs/InP 线性模式雪崩光电二极管阵列,信号放大时间计数型 CMOS 读出电路以及混合集成的 LM-APD-FPA 器件的设计和工艺制备,对器件最小可探测光功率、时间分辨率等主要性能参数进行了测试,结果达到预期水平,利用该器件在激光三维成像平台上进行了三维成像功能演示。

## 1 线性模式雪崩焦平面阵列设计与制备

### 1.1 器件结构与工作原理

线性模式雪崩焦平面阵列器件结构及照片如图 1 所示,由 InGaAs/InP 雪崩光电二极管阵列和在像素级实现信号放大和时间计数的 CMOS 读出电路芯片经 In 柱倒装互联混合集成。采用 256 针陶瓷壳体为器件提供机械支撑与电气接口。

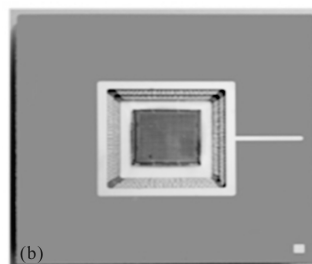
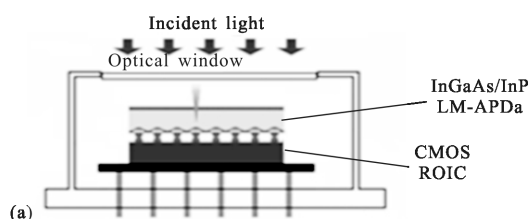


图 1 线性模式雪崩焦平面阵列器件结构(a)及照片(b)

Fig.1 Structure (a) and photo (b) of LM-APD-FPA

整个探测器由规模为 64×64 的 APD 光敏芯片阵列和读出电路构成,采用飞行时间(TOF)测距的工作模式。工作原理如图 2 所示,一束激光发出的瞬间,所有单元在外部控制时钟作用下开始计数,探测器的 APD 光敏芯片阵列工作于线性模式,在设定的距离门内如有激光脉冲进入,在 APD 的吸收区内产生光电子并在雪崩电场的作用下撞击出更多光电子,即产生雪崩增益,这个雪崩光电流再被该像素单元进行放大、阈值比较后,产生一个 TTL 电平 STOP,该信号使读出电路计时电路停止计数并记录该时刻信息,将其以二进制编码的形式读出到片外,经数据处理,即可得到目标的三维距离图像。

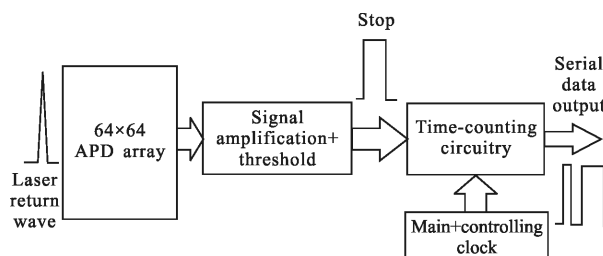


图 2 线性模式雪崩焦平面阵列器件工作原理

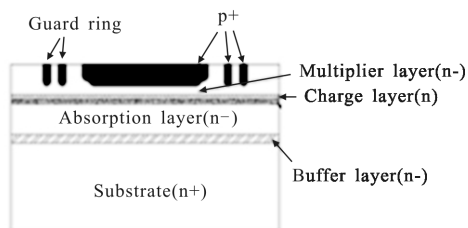
Fig.2 Operational principle of LM-APD-FPA

### 1.2 线性模式雪崩光电二极管及其阵列

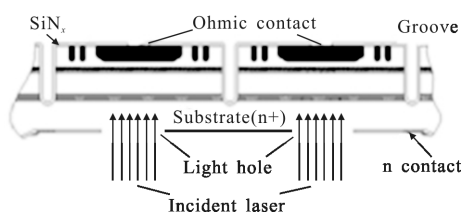
光敏芯片单管采用达通型分离吸收区、倍增区、电荷区、能带梯度区的(SAGCM)结构,如图 3(a)所示。

如图 3(a),电荷区为倍增区提供高电场(5~6)×10<sup>5</sup> V/cm,同时为吸收区产生低电场(≤2×10<sup>5</sup> V/cm),保证在倍增区产生高雪崩增益的同时阻止在吸收区产生隧道电流。由于雪崩发生在具有宽能隙的 InP 材料中(其能隙为 1.34 eV),而光吸收发生在具有窄能隙的 InGaAs 材料中(其能隙为 0.73 eV),二者之间存在势垒,使光生载流子在异质结发生堆积,影响芯片响应时间。为了克服这一缺点,在这两种材料之间

引入三级能带梯度材料  $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ , 其截止波长分别为  $\lambda_g=1.0\ \mu m$ 、 $\lambda_g=1.3\ \mu m$ 、 $\lambda_g=1.5\ \mu m$ , 帮助在吸收区产生的光生载流子容易进入倍增区。采用双浮动保护环和凸 PN 结, 阻止了 PN 结边缘由于弯曲引起的过早击穿, 使雪崩电场集中在光敏区(即 PN 结区)的中心部分, 得到高的平均雪崩增益。



(a) APD 单元结构示意图  
(a) Structure of APD



(b) APD 阵列结构示意图  
(b) Structure of APD array

图 3 APD 单元及阵列结构示意图  
Fig.3 Structure of the APD and array

传感器阵列芯片结构如图 3(b)所示, 每个像元的活动面(即 PN 结面)直径为  $50\ \mu m$ ; 为了减少像元之间的串扰, 采用沟道隔离; 考虑到保护环和横向耗尽宽度以及电子、空穴扩散长度, 每个像元之间的间隔目前为  $150\ \mu m$ , 采用背进光结构。64×64 APD 光敏芯片照片如图 4 所示。

64×64 APD 光敏芯片击穿电压和暗电流分布如图 5 所示, 在  $\pm 0.2\ V$  范围内呈现正态分布, 标准偏差

为  $0.37\ V$ , 暗电流均值为  $3.41\ nA$ 。对存在的早击穿点采取了屏蔽措施, 使其与相应的读出电路单元断开从而不影响整个器件工作。

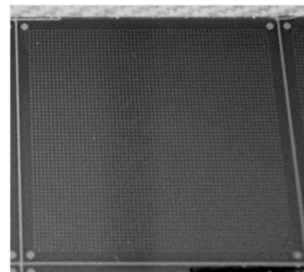


图 4 64×64 APD 光敏芯片照片

Fig.4 Photo of the 64×64 APD array

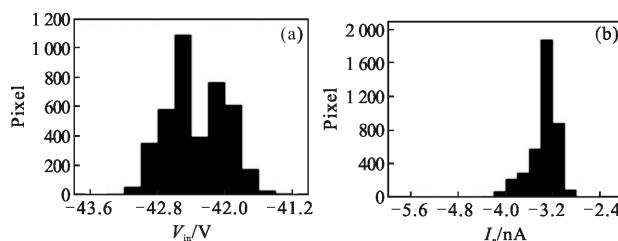


图 5 64×64 APD 光敏芯片击穿电压(a)和暗电流(b)分布图

Fig.5 Histogram of breakdown voltage (a) and dark current (b) of the 64×64 APD array

### 1.3 读出电路结构与特性

该探测器的读出电路是一大规高速数模混合 CMOS 集成电路, 每个单元包含了高速宽带前置放大器和主要由移位寄存器(LFSR)构成的计时器单元。由于雪崩信号的到达时刻是随机的, 这就要求每个像素要有独立的时间间隔测量功能。考虑到单元像素电路面积的限制及电路简化的原则, 采用时钟计数的方法将雪崩信号的到达时刻转化为数字信号, 即计数器在雪崩信号到达时立即停止计数。读出电路主要由数字外围电路、驱动电路和像素阵列三部分组成, 如图 6 所示。

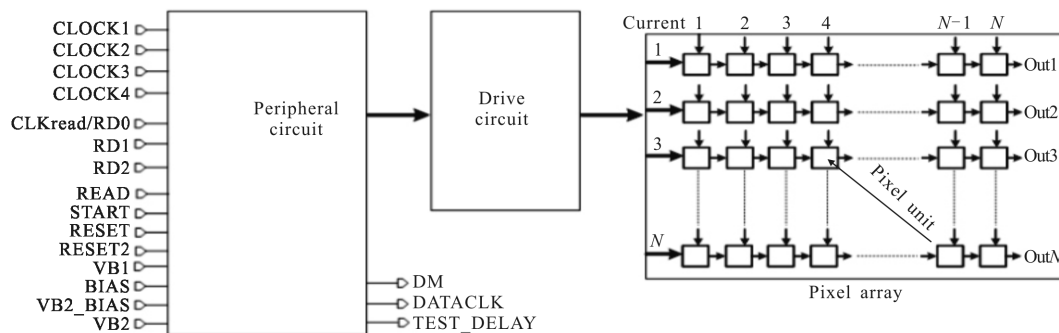


图 6 读出电路结构

Fig.6 Structure of the read-out circuit

64×64 读出电路版图和实物照片如图 7 所示。

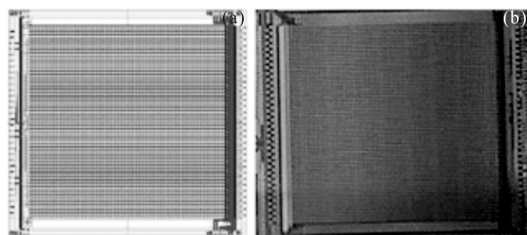


图 7 读出电路版图和实物照片

Fig.7 Layout and photo of the read-out circuit

像素电路主要由前置放大器、像素计数电路和辅助电路组成。电路的输入级采用 RGC 结构,如图 8 所示,它有着非常低的输入阻抗和稳定的直流偏置。利用 RGC 结构作为输入级的前置放大器能更好地抑制光敏芯片寄生电容对前置放大器带宽的影响,经后级电压放大和比较整形后,输出一个标志光脉冲信号到达时刻的 STOP 信号,用于后续 TDC 电路的计时。

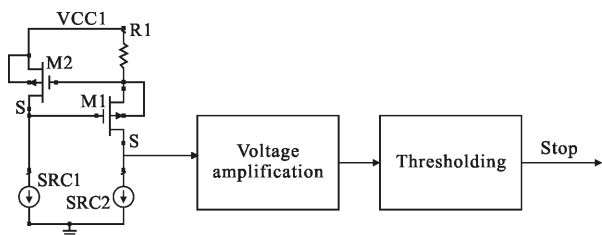


图 8 信号提取电路示意图

Fig.8 Schematic of the signal extraction circuit

兼顾测量距离和精度的要求,计时单元采用了两段共 14 位计数器,其中主计数器 10 位,分辨率为 8 ns;辅助计数器 4 位,分辨率为 1 ns,采用数字移相技术,利用四相时钟(如图 9 中的 G1~G4)相互之间

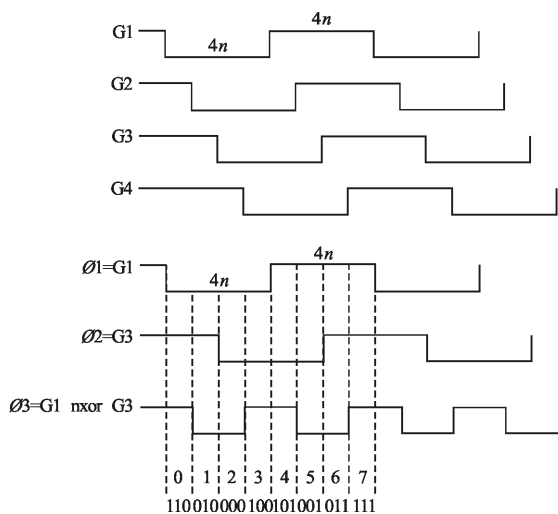


图 9 移相时钟示意图

Fig.9 Principle of the phase-shifting clock

相移 90°,在较低的主频(125 MHz)下实现了最小 1 ns 的时间分辨率。

## 2 性能参数测试

LM-APD FPA 的关键指标为最小可探测光功率  $P_{min}$  和时间分辨率  $\delta$ , 最小可探测光功率定义为使焦平面器件的有效像元与无光照时相比发生数据位跳变的最小脉冲激光峰值光功率, 时间分辨率定义为探测器可分辨的最小光脉冲前沿时差。在工作温度 300 K, APD 阵列偏压 40 V 的情况下,测量得到最小可探测光功率平均值为 400 nW@1 064 nm;时间分辨率为 1 ns。

## 3 三维成像试验演示

该试验主要评估原理试验样机对人造目标的成像能力及天气条件对成像的影响。试验在西南技术物理研究所综合大楼 901 试验室进行。试验在晴朗及微雨天气条件下进行,采用的激光器波长为 1 064 nm,脉宽为 5 ns,单脉冲能量为 100 mJ,重频为 20 Hz;光学接收镜头口径为 160 mm,64×64 激光焦平面探测器占空比约为 5%,结果如图 10 所示。试验表明原理试验样机能对 1 km 附近的人造目标实现三维成像,空间分辨率达到 64×64,距离分辨率为 15 cm,对建筑物的几何特征细节如阳台及墙面倾斜等有良好的呈现能力。另外,试验也证实了微雨天气对原理样机成像影响较小。以上试验验证了 64×64 InGaAs 雪崩阵列探测器可以实现无扫描激光三维成像。

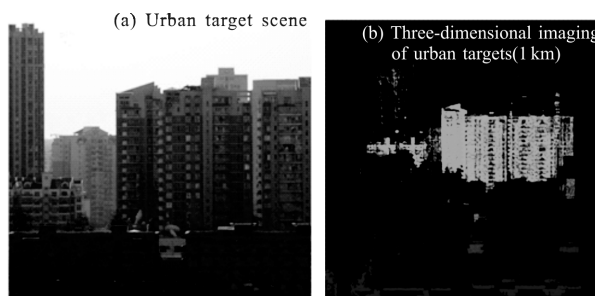


图 10 城市目标场景 3D 图像(1 km)

Fig.10 Urban target scene and three-dimensional image (1 km)

## 4 结论

研制了规模为 64×64,中心距离为 150  $\mu$ m 的背进光式平面结构 InGaAs/InP 雪崩光电二极管阵列,

与专用 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。经测试表明,该器件在 300 K 温度下,平均最小可探测光功率约为 400 nW@1 064 nm,时间分辨率为 1 ns,采用该器件实现了无扫描单脉冲激光三维成像。主要创新点是在国内率先实现了用线性模式 APD 阵列和专用集成电路形成了三维成像激光焦平面器件,和其他体制的激光焦平面探测器相比,其主要优势在于可以实现对高速运动目标的单脉冲瞬时成像,具有成像速度快、无死时间和后脉冲、数据处理简单等突出优点,在激光三维成像制导等军事领域有广阔的应用前景。不足之处在于目前探测灵敏度较低,下一步需要在光敏芯片材料、器件工艺、读出电路等方面持续开展研究,以达到实用化水平。

#### 参考文献:

- [1] Roger Stettner, Howard Bailey Silverman. Eye-safe laser radar 3-D imaging[C]//SPIE, 2001, 5412: 46-56.
- [2] Chao -I Chen, Roger Stettner. Drogue tracking using 3D flash lidar for autonomous aerial refueling [C]//SPIE, 2011, 8037: 80370Q.
- [3] Aull B F, Andrew H L, Young D J. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [C]//SPIE, 2004, 6014: 467-468.
- [4] Joseph Boaster, Ping Yuan, Paul McDonald, et al. Characterization of InGaAsP/InP APD arrays for SWIR imaging applications[C]//SPIE, 2004, 6214: 62140H.
- [5] Mark A Itzler, Mark Entwistle, Mark Owens, et al. InP-based Geiger-mode avalanche photodiode arrays for three-dimensional imaging at 1.06  $\mu\text{m}$ [C]//SPIE, 2009, 7320: 7320O.
- [6] Ilya Poberezhskiy, Andrew Johnson, Daniel Chang, et al. Flash lidar performance testing: configuration and results[C]//SPIE, 2012, 8379: 837905.
- [7] Roger Stettner, Howard Bailey. Large format time-of-flight focal plane detector development [C]//SPIE, 2005, 5791: 288-292.
- [8] Chen D Z, Zhang H, Leng J, et al. Active flash image lidar based on APD planar array [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6): 775-778. (in Chinese)
- [9] Zhang Xiuchuan, Jiang Liqun, Gao Xinjiang, et al. Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 356-391. (in Chinese)
- [10] Hao Lichao, Huang Aibo, Xie Xiaohui, et al. 32 $\times$ 32 very long wave infrared HgCdTe FPAs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0504001. (in Chinese)