

文章编号: 1672-8785(2014)12-0008-06

## 激光成像制导探测器研究进展

于晓辉<sup>1</sup> 吕衍秋<sup>2</sup> 孟 超<sup>2</sup>

(1. 海军驻洛阳地区航空军事代表室, 河南 洛阳 471009 ;

2. 中国空空导弹研究院红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 激光成像制导是精确制导的主要发展方向之一。激光成像制导探测器是激光成像系统的关键部件。介绍了国内外激光成像制导探测器的研究进展, 包括 HgCdTe 焦平面、Si 雪崩焦平面、InGaAs PIN 探测器和雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 焦平面。InGaAs APD 焦平面将会成为激光成像制导探测器的主要发展方向, 其关键技术包括外延材料生长、高均匀性探测器制备以及读出电路设计等。

**关键词:** 激光成像制导; 探测器; 焦平面; 雪崩光电二极管

**中图分类号:** TN2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.12.002

## Research Progress of Laser Imaging Guidance Detectors

YU Xiao-hui<sup>1</sup>, LV Yan-qiu<sup>2</sup>, MENG Chao<sup>2</sup>

(1. Aviation Military Representative Office of Navy in Luoyang Area, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector,  
China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** Laser imaging guidance is one of the development directions of precision guidance. A laser imaging guidance detector is the key component for a laser imaging system. The research progress of laser imaging guidance detectors including HgCdTe focal plane arrays, Si Avalanche Photodiode (APD) focal plane arrays and InGaAs PIN detector and APD focal plane arrays are presented. Among them, the InGaAs APD focal plane arrays will become the main development direction for laser imaging guidance detectors. Their key technologies include growth of epitaxial materials, fabrication of high uniformity detectors and design of readout circuits.

**Key words:** laser imaging guidance; detector; FPA; APD

### 0 引言

众所周知, 激光具有良好的空间相干性和时间相干性<sup>[1]</sup>。自从发现激光以来, 人们就开始考虑将其运用于军事领域, 并先后研制出了激光驾束制导导弹和激光半主动制导导弹。将激光成像制导技术用于提供目标的距离与速度

信息, 可提高目标的探测率和识别率。该技术是激光技术、雷达技术、光学扫描与控制技术、高灵敏度探测技术以及高速计算机处理技术的综合产物。激光成像制导武器利用激光束作为探测手段, 可以有效穿透一定的遮蔽物、伪装物及掩体。该武器具有抗电磁干扰能力强, 可全天时探测, 角度/距离/速度分辨率高, 同时获得目标

**收稿日期:** 2014-04-18

**作者简介:** 于晓辉 (1979-), 男, 山东威海人, 本科, 主要从事航空军械研究。

的强度像、距离像和速度像,可实现多目标成像与识别,成像直观以及制导精度高等特点。根据未来制导系统的“远、精、准”的发展需要,激光成像制导技术将成为今后发展的重点方向之一。该技术主要用于巡航导弹以及各种攻击武器(如灵巧炸弹和空空导弹等)的末制导段,而且还可用于飞行器导航、导弹防御、机器人视觉、直升机避障和无人机吊舱等场合。

激光成像制导的关键技术包括高功率、高波束质量的激光器,高灵敏度探测器以及图像处理与目标识别算法等<sup>[2]</sup>。目前常用的激光器一般工作在可见光与红外波段。由于可见光激光对人眼并不安全,且容易被敌方发现,所以目前军用激光器一般都工作在红外波段。高灵敏度焦平面探测器技术是激光成像制导技术的关键核心点。目前应用于激光成像制导的探测器主要有 Si 探测器、InGaAs 探测器和 HgCdTe 探测器。而波长小于  $1.47\ \mu\text{m}$  的激光对人眼是不安全的,所以对入眼安全的波长大于  $1.47\ \mu\text{m}$  的短波红外激光应该成为军方优先扶持发展的主要方向。例如,波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  的激光器除了因对人眼安全可保护友方士兵免受反射光影响之外,还能避免被敌方像增强管发现。这样既可减小被发现、歼灭的危险,又可最大限度地保护己方的有生力量。

## 1 激光成像制导技术的发展历程

在 20 世纪 60 年代中期,美国伯金艾莫尔公司研制出了世界上第一台 He-Ne 激光跟踪测量雷达。雷神公司和西尔瓦尼亚公司在随后的几年里相继成功研制了第一台  $\text{CO}_2$  相干激光雷达和第一台 YAG 单脉冲激光雷达。在 20 世纪 80 年代后期,在二极管阵列及其泵浦激光器的基础上,半导体激光雷达也开始得到发展<sup>[3]</sup>。1985 年,美国空军怀特实验室开始对固态激光雷达进行研究,并在子弹药制导项目中研制出了两种低成本激光雷达导引头。它们分别是基于 24 单元阵列 GaAs 半导体二极管的激光雷达导引头和基于 Nd:YLF 二极管泵浦的固态激光雷达导

引头,其有效作用距离分别为 200 m 和 2 km。由于扫描型激光成像技术成像速率低、价格昂贵,西方各国于 20 世纪 90 年代开始研究非扫描型激光雷达成像技术。该技术能够解决激光扫描成像技术所带来的问题,因此激光成像制导技术的发展方向也由扫描型转变成非扫描凝视型。2002 年,美国麻省理工学院林肯实验室研制出一种基于  $4\times 4$  元盖革模式 Si-APD 的三维激光雷达样机 (Gen-I 系统)。2006 年,他们又研制出基于  $32\times 32$  元盖革模式 Si-APD 的激光雷达实验样机 (Gen-III 系统)。该系统的激光波长为 532 nm,测距范围小于 500 m,测距分辨率为 40 cm。2010 年,美国先进科学概念公司研制出一种基于  $128\times 128$  元 InGaAs APD 探测器的“龙眼”闪光成像雷达。该雷达的激光波长为 1570 nm,测距精度为 5 ~ 60 cm。2011 年,美国林肯实验室研制出了一种基于  $32\times 128$  元盖革模式 APD 阵列的机载雷达成像研究试验台 (Airborne Ladar Imaging Research Testbed, ALIRT) 系统。该系统可以从高度为 9 km 的空中对地面进行快速的高分辨率三维成像,其在 3 km 高度上的距离分辨率为 10 cm。目前,三维成像激光雷达研究已经取得了重大突破。人们研制出了高功率二极管泵浦源和高效光学谐振腔,解决了激光雷达作用距离有限和缺少全天候作战能力等问题,实现了自主制导以及较高分辨率等目标。

## 2 激光制导探测器研究现状

### 2.1 HgCdTe 焦平面

国外 HgCdTe 焦平面器件的研究发展迅速,其研究机构主要包括美国的 DRS 公司和雷神公司、英国的 SELEX 公司和 BAE 系统公司以及法国的 CEA-LETI 研究中心和 Sofradir 公司。2001 年,美国国防先进研究计划局 (DARPA) 制定了三维成像传感器计划,旨在研究基于碲镉汞 APD 的材料生长技术、探测器技术、读出电路技术以及三维成像激光雷达原理样机等。其中,洛克希德·马丁公司 (由 DRS 公司提供探测器) 和雷神公司分别采用  $128\times 128$  元和  $32\times 2$  元/ $10\times 10$  元碲

碲镉汞 APD 探测器阵列, 在  $1.55\ \mu\text{m}$  处实现了激光雷达主动探测<sup>[4-7]</sup>。2004 年, BAE 系统公司研制出了一种基于  $1.57\ \mu\text{m}$  光纤激光器的激光选通成像系统, 其探测器采用  $320\times 256$  元碲镉汞 APD 阵列,  $77\ \text{K}$  温度下的截止波长为  $4.5\ \mu\text{m}$ ,  $7\ \text{V}$  电压下的增益为 97, 选通时间为  $60\ \text{ns}$ , 景深为  $9\ \text{m}$ 。2006 年, SELEX 公司提升了激光选通雷达的性能。此前, 该雷达系统已工作 4.5 年, 其中一个探测器的寿命达到了 1300 h 以及  $1100\ \text{K}$  温度循环。其探测器在  $77\ \text{K}$  下的截止波长为  $4\ \mu\text{m}$ , 所对应的工作电压小于标准 CMOS 电路的安全电压 ( $6\ \text{V}$ ), 而且还可分别实现近红外激光雷达成像和中红外热成像<sup>[8]</sup>。2010 年, SELEX 公司将碲镉汞 APD 的探测波长从  $4.5\ \mu\text{m}$  缩短到  $2.5\ \mu\text{m}$  以进一步减小暗电流<sup>[9]</sup>。该公司研制的中波 APD 激光雷达系统已经可以在 13000 in 高空对地面进行清晰成像 (见图 1)<sup>[10]</sup>。2012 年, 法国 CEA-LETI 研究中心演示了一种由  $1.57\ \mu\text{m}$  激光器和一个截止波长为  $3.1\ \mu\text{m}$  的  $32\times 256$  元碲镉汞 APD 阵列组成的激光雷达系统。这个 APD 阵

列的工作温度为  $200\ \text{K}$ , 激光器的脉宽为  $8\ \text{ns}$ , 峰值能量为  $8\ \text{mJ}$ ,  $6\ \text{V}$  反偏压下的 APD 增益为 23。该系统在  $50\ \text{mV}$  偏压下可实现被动红外成像; 主动成像时可对  $30\ \text{m}$  内的运动物体进行成像, 其精度为  $9\ \text{cm}$ <sup>[11]</sup>。

## 2.2 Si 雪崩焦平面

四象限盖革模式 Si-APD 已经成功用于激光制导炸弹系统, 比如宝石路系列炸弹。我国的相关研究工作也进入到了工程应用阶段。但是, 用于激光三维成像的 Si 雪崩焦平面的研制工作已经受到了很多国家的普遍重视<sup>[12]</sup>, 其中包括混合集成型盖革模式 APD 阵列和单片集成型盖革模式 APD 阵列两种。前者主要由美国麻省理工学院林肯实验室的研究人员使用。2002 年, 该实验室报道了一种基于盖革模式 Si-APD 阵列的三维激光雷达成像系统, 其 APD 阵列的规格为  $4\times 4$  元, 单元尺寸为  $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ , 有效面积为  $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>; 此后他们还研制出了  $32\times 32$  元混成式盖革模式 Si-APD<sup>[13]</sup>。他们通过

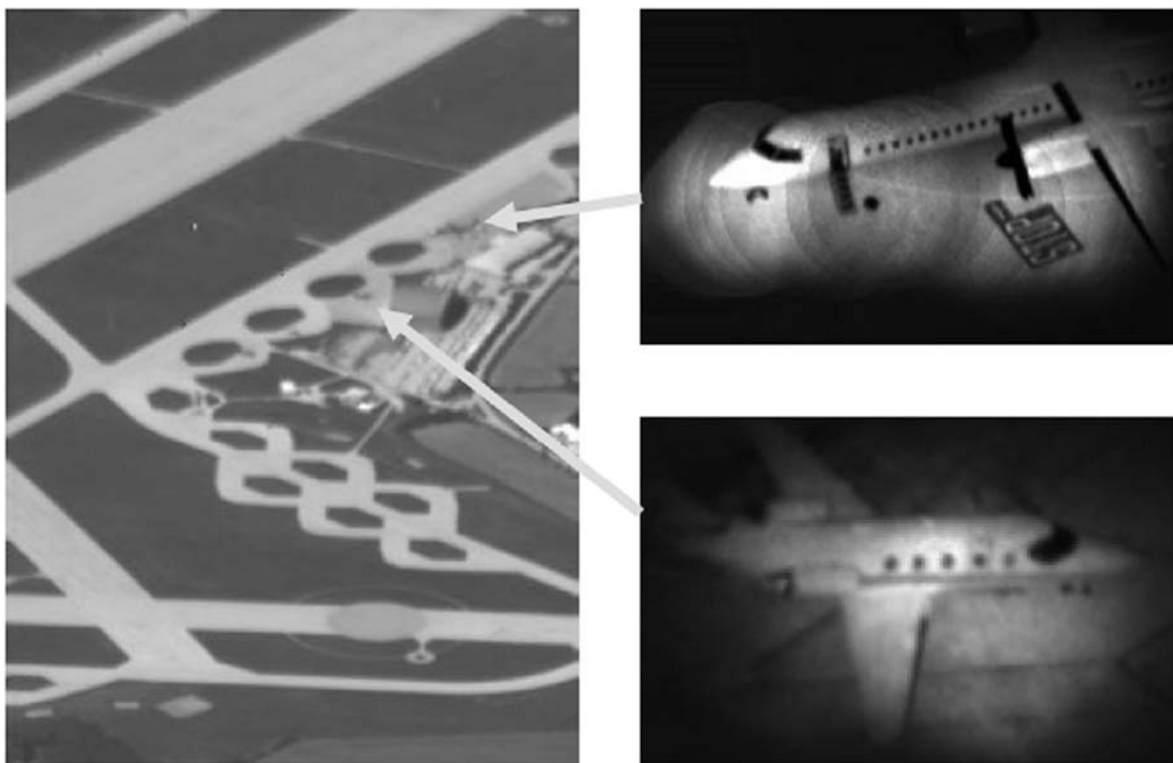


图 1 在 13000 英尺的高度下, 采用  $320\times 256$  元碲镉汞 APD 阵列进行被动热成像及激光主动成像时得到的试验结果

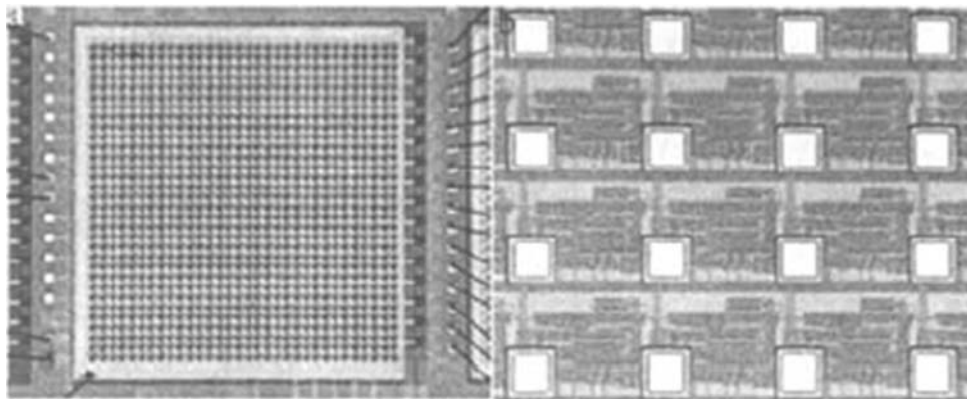


图 2 32×32 元混成式盖革模式 Si-APD 阵列的图片以及 Si 读出电路的局部放大图

钢柱互连技术把盖革模式 APD 阵列探测器与 Si 读出电路集成到了一起, 如图 2 所示。其中, 每个像元均为平面结构, 像元尺寸为  $30 \sim 50 \mu\text{m}$ , 像元间距为  $100 \mu\text{m}$ 。该探测器采用  $-23.5 \text{ V}$  和  $5 \text{ V}$  两种工作电压, 此时 APD 的反偏压为  $28.5 \text{ V}$ , 高于击穿电压。2011 年, 林肯实验室报道了一种  $256 \times 256$  元盖格模式 Si-APD 阵列。他们将其与电路进行互连, 组成了焦平面器件<sup>[14]</sup>。

单片集成型盖格模式 Si-APD 技术主要由瑞士洛桑联邦理工学院和意大利米兰理工大学等机构的研究人员使用。他们通过特殊工艺把盖格模式 APD 阵列探测器与读出电路集成到了一起。图 2 所示为其研制的  $32 \times 32$  元单片集成型盖格模式 Si-APD 阵列。他们采用  $0.8 \mu\text{m}$  CMOS 工艺同时制备了探测器和集成电路。光敏面的直径为  $38 \mu\text{m}$ , 间距为  $58 \mu\text{m}$ 。该探测器阵列采用  $-25.5 \text{ V}$  和  $5 \text{ V}$  两组电压, 使盖格模式 APD 处在  $30.5 \text{ V}$  偏压下。这种电路与探测器制备技术比较复杂, 不容易得到扩展。盖格模式 Si-APD 焦平面主要用于探测可见激光, 但由于可见激光会对人眼造成损伤, 其应用受到了一定的限制。2008 年, 瑞士洛桑联邦理工学院报道了一种像元尺寸为  $25 \mu\text{m}$  的  $128 \times 128$  元 Si-APD 阵列。该阵列采用  $0.35 \mu\text{m}$  CMOS 工艺制备而成, 并实现了三维成像。图 3 为  $32 \times 32$  元单片集成型盖格模式 Si-APD 阵列的图片及其像元的放大图<sup>[15]</sup>。

### 2.3 InGaAs 焦平面

激光成像 InGaAs 焦平面探测器正朝两个方向发展: 一是提高激光辐射源的能量, 比如二极

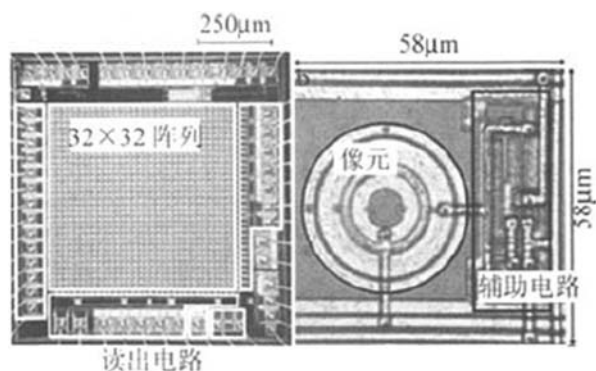


图 3  $32 \times 32$  元单片集成型盖格模式 Si-APD 阵列的图片及其像元的放大图

管二维阵列激光器, 此时可以采用光伏型 InGaAs 焦平面探测器; 另外一个则是直接采用雪崩型 InGaAs 焦平面探测器。

#### 2.3.1 InGaAs PIN 焦平面

2001 年, 德国 Federal 国防大学将  $128 \times 128$  元 InGaAs PIN 短波凝视焦平面作为探测器演示了激光成像原理样机。该设备采用美国传感器无限公司生产的  $128 \times 128$  元 InGaAs 焦平面以及 Nd:YAG OPO 激光器, 其激光波长为  $1574 \text{ nm}$  (对人眼安全), 而且成像结果良好。由于目前受到此波段激光器的功率限制, 这种方式的激光成像距离有限, 大约为  $1 \text{ km}$ 。目前, 美国传感器无限公司 (现被 Goodrich 公司收购) 在 InGaAs 探测器研究方面处于世界领先地位。该公司研制的基于  $128 \times 128$  元、 $320 \times 240$  元、 $320 \times 256$  元和  $640 \times 512$  元红外焦平面的微型近红外相机已经实现了产业化, 其平均探测率为  $6 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ , 量子效率大于  $70\%$ 。他们已经成功研制出  $1024 \times 1024$

元和  $1280 \times 1024$  元 InGaAs 短波凝视焦平面。另外,日本滨松公司、美国 Indigo 公司和比利时 Xenics 公司等也在从事 InGaAs 焦平面研制工作。

### 2.3.2 InGaAs APD 焦平面

为了探测对人眼安全的  $1.55 \mu\text{m}$  信号,人们研制了一种截止波长为  $1.7 \mu\text{m}$  的 InP 基 InGaAs APD。由于 InGaAs APD 探测器在探测率上可以比 InGaAs PIN 探测器高一个数量级,InGaAs APD 焦平面是激光成像制导探测器的主要发展方向。很多西方国家都加强了对 InGaAs APD 焦平面的研究力度。基于 InGaAs APD 焦平面的系统具有较远的作用距离,且不会存在距离模糊问题;无需使用复杂的高速扫描装置,体积小、重量轻、成本低、适装性好,因此更适用于空空导弹和巡航导弹的末制导系统等。

在 20 世纪 90 年代初期,美国 Hercules 防御中心成功研制了一台用于战场监视的  $1.32 \mu\text{m}$  固体激光成像雷达。该系统采用基于连续波激光二极管泵浦 Q 开关的 Nd:YLF 激光器以及 InGaAs APD 焦平面,其噪声等效功率为  $0.8 \times 10^{-8} \text{ W}$ ,最小可探测信号功率为  $1.5 \times 10^{-7} \text{ W}$ ,成像试验中的距离分辨率为  $0.25 \text{ m}$ ,最大距离为  $2 \text{ km}$ 。美国海军的机载“门警”系统中的激光雷达采用工作波长为  $1.571 \mu\text{m}$  的 Nd:YAG 泵浦 KTP OPO 激光器以及 InGaAs APD 焦平面,其测距精度为  $1 \text{ m}$ 。洛克希德·马丁公司的低成本自主攻击系统是美国陆空军联合发展的子导弹。该系统采用基于惯性/GPS 装置和激光雷达寻的器的制导系统,可以由 AGM-130 导弹、AGM-154 导弹、多管火箭炮系统火箭弹、陆军战术导弹系统和 SUU-64 战术弹药撒布器投放。激光雷达寻的器能够搜索  $370 \text{ m} \times 900 \text{ m}$  大小的范围,并产生分辨率为  $15 \text{ cm}$  的三维目标影像,以保证准确识别目标。2008 年,美国军方与普林斯顿光波公司签署了一份为期 2 年、价值 350 万美元的合同。该公司负责开发用于三维成像闪光激光雷达系统的基于 InP 盖革模式 APD 的焦平面阵列模块。这种单光子灵敏模块可用作三维成像闪光雷达系统芯片的光学“引擎”。

单元雪崩 InGaAs 探测器的研制难度较小,目前在市场上已有商品出售,但是多元和面阵探测器的研制工作较为困难。InGaAs APD 焦平面阵列组件是非扫描型三维成像激光雷达的关键部件。2008 年,林肯实验室先后成功研制出了  $128 \times 32$  元和  $256 \times 64$  元盖革模式 InGaAs APD 阵列。截至 2011 年,APD 阵列的规格已经达到  $256 \times 256$  元。另外还有许多研究机构都对 InP 基 APD 进行了大量研究,比如波音公司下属的 Spectralab 公司等。由于此类 APD 探测器在大偏压下的隧穿电流较大,电子和空穴都参与倍增过程,导致过剩噪声较大。因此需要进行能带工程调控(比如使用异质结进行倍增分离),并通过优化掺杂及扩散过程来抑制过剩噪声。图 4 为 InGaAs APD 的结构示意图。不管是从外延材料的设计还是从探测器的制备工艺上来讲,InGaAs APD 都比 InGaAs PIN 二极管复杂得多。前者采用吸收区与倍增区渐变分离的 APD 结构。其中,PN 结被设计在宽带隙 InP 层中,以减小器件的暗电流;同时,通过在 InP 与 InGaAs 之间引入能带渐变的 InGaAsP,可以缩短光生载流子在其界面上的积累时间。在探测器的制备工艺中,研究人员采取了两步扩散的办法:一是在 InP 层中形成 PN 结;二是在探测器的周围形成保护环,以防因偏压过高而导致器件击穿。另外,由于照明激光脉冲的能量有限(这与激光能量及大气传输效率等因素有关),为保证得到一定的作用距离,APD 焦平面阵列组件的尺寸不能做得太大,因此会牺牲一定的空间分辨率。

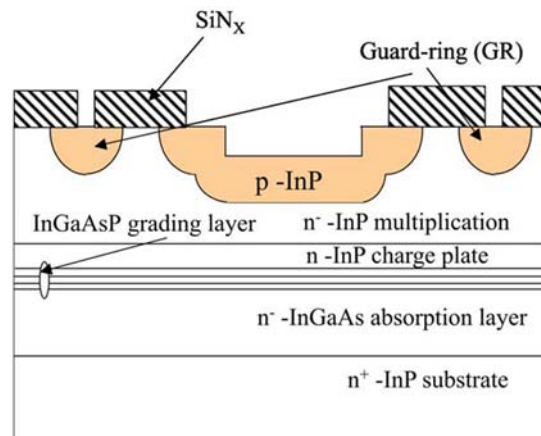


图 4 InGaAs APD 的结构示意图

目前, 国内的 InGaAs APD 研究还处于起步阶段, 大多数研究人员都是对进口的单元 InGaAs APD 进行单光子探测研究, 或者是对 InGaAs APD 进行理论优化。2007 年, 重庆邮电大学研制出了四象限 InGaAs APD 探测器, 其响应时间  $\leq 1.5$  ns, 响应度  $\geq 9.5$  A/W, 暗电流  $\leq 40$  nA。中国电子集团公司第 44 研究所已经研制出了单元和四元 InGaAs APD 产品, 其响应时间为 1 ns, 响应度为 9 A/W, 反偏电压为 25 V。

### 3 结束语

当前包括美国在内的西方发达国家正致力于激光成像系统研究, 特别是在雪崩焦平面探测器方面。国内的激光成像制导技术还处于理论论证阶段, 因此需要加强焦平面探测器、三维图像处理及目标识别算法研究, 以尽快实现激光成像制导应用。InGaAs APD 焦平面将会成为激光成像制导探测器的主要发展方向。开展 InGaAs 面阵焦平面研究已显得越来越紧迫, 特别是在外延材料生长、高均匀性探测器制备以及读出电路设计等方面尤为如此。

### 参考文献

- [1] 迪晓光, 周凤岐, 周军. 激光主动成像制导导引头设计方法研究 [J]. 红外技术, 2003, 25(3): 32-36.
- [2] 李洪儒, 吴甲生, 马洪忠. 成像激光雷达及其在小型弹药上的应用 [J]. 飞航导弹, 2007, 17(5): 47-49.
- [3] 陈建新, 姜兴山. CO<sub>2</sub> 激光成像雷达扫描技术的发展 [J]. 激光与光电子学进展, 1999, 40(3): 31-34.
- [4] Mark Browder. Three Dimensional Imaging Sensors Program [C]. SPIE, 2001, 4377: 73.
- [5] Maurice J H, Michael J. 3-D Flash Ladar at Raytheon [C]. SPIE, 2001, 4377: 84.
- [6] Jack M D. Advances in Linear and Area HgCdTe APD Arrays for Eyesafe LADAR Sensors [C]. SPIE, 2001, 4454: 198.
- [7] Maurice J H. Eyesafe 3-D Flash Ladar for Targets under Obscuration [C]. SPIE, 2003, 5086: 70.
- [8] Stuart D. Advances in Laser Gated Imaging in an Airborne Environment [C]. SPIE, 2006, 6206: 620607.
- [9] Gert Finger, Ian Baker. Development of High Speed Low Noise NIR HgCdTe Avalanche Photodiode Arrays for Adaptive Optics and Interferometry [C]. SPIE, 2010, 7742: 77421K.
- [10] Ian Baker, Chris Maxey. Developments in MOVPE HgCdTe Arrays for Passive and ActiveInfrared Imaging [C]. SPIE, 2012, 8542: 85421A.
- [11] Eric de Borniol, Johan Rothman. Active Three-dimensional and Thermal Imaging with a 30  $\mu$ m Pitch 320 $\times$ 256 HgCdTe Avalanche Photodiode Focal Plane Array [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 061305.
- [12] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G, et al. Three-dimensional Imaging Laser Radar with a Pphoton-counting Avalanche Photodiode Array and Microchip Laser [J]. Appl Opt, 2002, 41(35): 7671-7678.
- [13] Aull B F, Loomis A H, Young D J, et al. Three-dimensional Imaging with Arrays of Geiger-mode Avalanche Photodiodes [C]. Baltimore: Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003: 105-116.
- [14] Figer D F, Lee J, Hanold B J, et al. A Photon-counting Detector for Exoplanet Missions [C]. SPIE, 2011, 8151: 81510K.
- [15] Niclass C, Ecole P, Lausanne F, et al. A 128 $\times$ 128 Single-Photon Imager with on-Chip Column-Level 10b Time-to-Digital Converter Array Capable of 97ps Resolution [C]. San Francisco: IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2008: 144-594.

### 新闻动态 News

## 法国 Sofradir 公司为日本 HAYABUSA-2 深空任务提供红外探测器

据 [www.sofradir.com](http://www.sofradir.com) 网站报道, 日本 HAYABUSA-2 空间探测器于 2014 年 12 月 3 日顺利

发射, 其搭载的 MicrOmega 高光谱显微镜采用了法国 Sofradir 公司生产的 NEPTUNE 型探测器。该探测器基于像元间距为 30  $\mu$ m 的 500 $\times$ 256 元 HgCdTe 阵列, 用于在 365 个光谱通道 (0.95 ~ 3.65  $\mu$ m) 上对 “1999 JU3” 小行星的表面进行成像, 以确定其物质成分 (无机物、有机物或水)。

□ 岳桢干