

InGaAs 近红外激光雷达光电探测器研究进展

邢悦, 宛芳, 罗盛慧, 沈梦, 罗林保*

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:激光雷达是激光探测及测距系统的简称,它可以发射定位激光束,通过测定传感器、发射器与目标物体之间的传播距离来定位目标物体的位置,并呈现目标物体的三维结构信息。InGaAs是一种典型的III-V族半导体材料,它在(0.35~1.42)eV范围内可调的禁带宽度使其在(0.9~1.7) μm 波段具有广泛的应用,被认为是1550nm激光雷达探测器的理想材料。本文综述基于InGaAs的激光雷达光电探测器的器件结构、光电特性及InGaAs焦平面光电探测器在激光雷达探测领域的研究进展。目前,基于InGaAs光电探测器的最大响应度达0.57A/W,最低暗电流低于0.75pA/ μm^2 ,焦平面阵列已经发展到1280 \times 1024,像元间距15 μm 。InGaAs近红外激光雷达探测器的响应波段位于1550nm,具有人眼安全、发射激光功率大、大气透过率高等优势,探测距离可达150m,大视野120 $^\circ$ \times 25 $^\circ$,在高阶辅助驾驶、无人驾驶、服务机器人等领域具有较大的应用潜力。

关键词:激光雷达;InGaAs光电探测器;焦平面探测器;近红外

中图分类号:TN215

文献标志码:A

文章编号:1007-4260(2022)02-0006-09

Recent Progress in InGaAs Near Infrared LIDAR Photodetector

XING Yue, WAN Fang, LUO Shenghui, SHEN Meng, LUO Linbao*

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Lidar is the abbreviation of laser detection and ranging system. It can emit a positioning laser beam, by determining the propagation distance between the sensor transmitter and the target object, so as to locate the position of the target object and present the three-dimensional structure information of the target object. InGaAs is a typical III-V semiconductor material, whose tunable band gap in the range of (0.35~1.42)eV makes it suitable for a wide range of applications in the (0.9~1.7) μm band. Therefore, it is considered as an ideal material for 1550nm lidar. This paper mainly the device structure and related optoelectronic properties of the InGaAs-based lidar photodetector and the research progress of InGaAs focal plane photodetectors in the field of lidar detection. The maximum responsivity of InGaAs photodetector is 0.57A/W, and the lowest dark current is lower than 0.75pA/ μm^2 . The focal plane array has been developed to 1280 \times 1024 with pixel spacing of 15 μm . InGaAs near-infrared lidar, with the response band of 1550nm, has the advantages of human eye safety, high laser power, and high atmospheric transmittance. The detection range can be up to 150m, and the wide field of vision is 120 $^\circ$ \times 25 $^\circ$. Therefore, it has great application potential in the fields of high-level assisted driving, unmanned driving, and service robots.

Key words: lidar; InGaAs photodetector; focal plane arrays detector; near infrared

激光雷达是通过发射探测激光,并接收探测物体反射的回波信号分析探测物体的距离、位置、角度的雷达系统,可以实现测距^[1-2]、三维成像^[3-4]、大气检测^[5]等等。目前,各种快速、小型、固态、低功耗的激光

收谢日期:2022-02-25

基金项目:国家自然科学基金(62074048)

作者简介:邢悦(1994—),女,安徽阜阳人,合肥工业大学微电子学院硕士研究生,主要研究方向为InGaAs光电探测器与FPGA相关应用。E-mail: xingyue@mail.hfut.edu.cn

通信作者:罗林保(1981—),男,安徽肥东人,博士,合肥工业大学微电子学院教授,博士生导师,主要从事新型高性能半导体光电子器件和光电集成方面的研究。E-mail: luolb@hfut.edu.cn

二极管和探测器发展迅速,在商业市场上得到了广泛的应用。由于这些设备大多易于通过光纤耦合连接,因此它们在光处理和设计激光雷达接收器方面非常实用。激光雷达主要由4个部分组成,发射激光模块、扫描系统、接收模块、信息处理模块,其中接收模块主要是光电探测器,用以接收回波信号,是激光雷达的关键部件。

目前商用激光雷达大部分是硅基光电探测器^[6],探测波段是905 nm,但是它的抗天气干扰能力偏弱,对雨雾的穿透力不足,而且905 nm位于人眼危险波段,必须限制功率以减小其对人眼的伤害。研究表明,人眼最大允许曝光功率与波长有关,其安全波长区域大于1.4 μm^[7]。InGaAs光电探测器的工作波长是1 550 nm,属于人眼安全波段^[8],所以在阳光背景噪声和测量距离方面具有明显的优势,对于低反射率的物体的灵敏度更高。

InGaAs作为一种典型的III-V族半导体材料,具有高量子效率和高电子迁移率等特性,且带隙可调,响应波长范围广。InGaAs优异的物理特性使其在短波红外光电探测器方面具有广泛的应用前景。成熟的分子外延技术(MBE)、金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)等技术的发展极大地推动了InGaAs外延层的生长和InGaAs光电探测器的研究。近些年有关InGaAs光电探测器的研究主要集中在单光子光电探测器和焦平面探测器,单光子探测器具有更高的响应速度,更低的暗电流,其中单光子二极管和淬灭电路是必不可少的两个核心组成部分,前者决定探测器的探测效率、暗计数等等,后者决定探测器是主动淬灭模式还是被动淬灭模式,并完成模数转换和计数。但由于InGaAs/InP材料制备水平限制,材料内部缺陷相对较多,因此暗计数明显偏高,后续增加电解质-金属反射层或使用InGaAsP作为吸收层材料,可有效降低暗计数。InGaAs焦平面探测器具有高灵敏度、高效率等优点,可以扩展视野、提高观察精度、收集更多信息,目前1 280×1 024规模面阵,像元间距15 μm的焦平面探测器技术已经成熟,但是目前面阵规模还不能满足市场需求,下一步向着更大规模面阵(如2 560×2 048)发展,像元中心距也不能满足光电探测器的高度集成,必须进一步减小像元中心距,提高阵列规模和探测精度。在1 550 nm激光雷达方面,InGaAs激光雷达探测器是新型产业,行业内Luminar是领军人物,与此同时,镭神智能、华为和昂纳科技也紧随其后,并各自发布了自主研发的1 550 nm激光雷达。

为了将来更有针对性地研究InGaAs光电探测器,本文对其相关的关键研究领域做一综述。首先介绍InGaAs材料的物理化学性质,进一步综述InGaAs光电探测器的结构、焦平面、以及激光雷达的研究进展,并探讨后续激光雷达的发展方向,这对InGaAs在激光雷达方面的进一步广泛应用有一定的指导意义。

1 InGaAs 带隙调控研究

InGaAs属于直接带隙半导体,是一种GaAs和InAs形成的III-V族混合固溶体,其晶格结构为闪锌矿立方晶格结构,禁带宽度可调,如图1所示。通过调节两种物质的比例,使其禁带宽度可从InAs的0.35 eV变到GaAs的1.42 eV,晶格常数从InAs的6.058 3 Å变化至GaAs的5.653 3 Å^[9],目前已经在(0.9~1.7) μm波段得到广泛的应用。InGaAs具有很多优异的物理化学性能,例如电子迁移率高、稳定性优异等,这使其在电力电子器件和近红外激光雷达探测方面具有广泛的应用前景。

制备高性能光电器件的基础保障是高质量的材料,表1给出了InP、In_{0.53}Ga_{0.47}As、In_{1-x}Ga_xAs在300 K的基本材料参数^[10],由晶格常数与组分关系图可以看出,In_xGa_{1-x}As的晶格常数与组分服从Vegard关系^[11]:

$$a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} = 6.0583 - 0.405(1-x) \text{ \AA} \quad (1)$$

当In_xGa_{1-x}As中x的比例为0.53时,In_{0.53}Ga_{0.47}As外延材料和InP衬底具有相同的晶格常数5.868 7 Å,

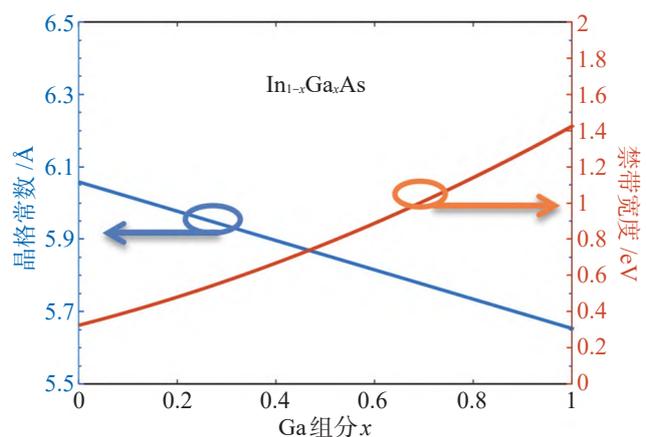


图1^[9] In_{1-x}Ga_xAs禁带宽度及晶格常数与组分x关系图

晶格完全匹配。所以为了解决晶格失配问题,一般以InP材料作为衬底,在InP衬底上长出高质量的外延层。这时禁带宽度约为0.75 eV,对应截止波长是1.7 μm ,因此可以在1.5 μm 波段发挥重要作用。在InGaAs光电探测器的制备过程中,采用技术有分子束外延技术(MBE)、金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)、液相外延技术(LPE)、气相外延技术(VPE)等,其中比较常用的是MBE和MOCVD,成熟的InGaAs外延技术为InGaAs光电探测器的商业化奠定了坚实的基础。

表1^[10] InP、In_{0.53}Ga_{0.47}As、In_{1-x}Ga_xAs的基本参数(300 K)

参数	InP	In _{0.53} Ga _{0.47} As	In _{1-x} Ga _x As
晶格结构	闪锌矿	闪锌矿	闪锌矿
晶格常数 /Å	5.868 7	5.868 7	6.058 3 - 0.405(1-x)
禁带宽度 /eV	1.344	0.750	0.324 + 0.7(1-x)+0.4(1-x) ²
低频介电常数	12.5	13.9	15.1 - 2.87(1-x)+0.67(1-x) ²
高频介电常数	9.61	11.60	12.3 - 1.4(1-x)
本征载流子浓度 /cm ⁻³	1.3 × 10 ⁷	6.1 × 10 ¹¹	
电子迁移率 /(cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	≤5 400	≤12 000	40 - 80.7(1-x)+49.2(1-x) ² × 10 ³
空穴迁移率 /(cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	≤200	≤300	
电子有效质量	0.080	0.041	0.023 + 0.037(1-x)+0.003(1-x) ²
轻空穴有效质量	0.089	0.052	0.026 + 0.056(1-x)
重空穴有效质量	0.60	0.45	0.41 + 0.1(1-x)

2 InGaAs 光电探测器的结构

从20世纪80年代开始,国内外研究者们纷纷研究InGaAs光电探测器的结构,总结起来,主要分为3种,分别为InGaAs金属-半导体-金属光电探测器(MSM-PD)^[12]、InGaAs PIN光电探测器(PIN-PD)^[10]和InGaAs雪崩光电探测器(APD-PD)^[13]。不同结构的InGaAs光电探测器制作流程及制作成本有显著的区别,器件性能也存在较大差异。

InGaAs金属-半导体-金属光电探测器结构示意图如下页图2(a)所示,是基于肖特基结的一种特殊结构。1992年,Shi等^[14]采用低压金属有机气相外延技术(LP-MOVPE)生长外延层并制备了InGaAs MSM光电探测器,该器件在1.3 μm 波长下具有高响应度0.42 A/W,在1.5 V下暗电流低于5.6 pA/ μm^2 。1996年,zhang等^[15]采用气相分子束外延(GSMBE)生长InAlAs-InGaAs-InP外延层,InAlAs层显示出高电阻率特性,通过X射线衍射法测量,优化了生长条件,使得InGaAs和InAlAs层的晶格失配在 1×10^{-3} 范围内。从而优化了器件性能,在10 V下暗电流低于0.75 pA/ μm^2 ,在5 V下快速瞬态响应达16 ps。从整体来说,MSM结构光电探测器结构简单、易于集成,表现出较低的暗电流(pA量级),但是金属电极会减小器件的有效光吸收面积,所以响应度相对其他结构较低。

InGaAs PIN光电探测器在P型接触层与N型接触层之间插入一层本征层,结构如下页图2(b)所示,使得耗尽区的宽度增大,从而辐射出更多电子-空穴对,形成更大光电流,因此具有优良的电子传导性能。2007年,A. Poloczek^[15]等采用MBE生长低温缓冲层,改善了表面粗糙度,克服了Si和InP之间的晶格失配,使用MOCVD在InP衬底集成InGaAs PIN结构,该器件的响应度约为0.57 A/W。2011年,陆军研究实验室(ALR)^[16]使用PIN光电探测器,研究了一种用于小型无人地面车辆的导航、障碍物/碰撞避免和目标检测/识别短程的激光雷达成像仪,与低成本微波放大器芯片集成,显著改善了InGaAs PIN光电探测器的信噪比。在此基础上,2012年,ALR^[17]将这一激光雷达成像仪用于机器人,探测距离达50 m以上,分辨率提高到256×128。

InGaAs雪崩光电探测器是一种带有增益的光电探测器,结构如图2(c)所示,电子-空穴对在倍增区内部电场的作用下获得足够多的能量,从而与原子发生碰撞,产生新的电子-空穴对,形成雪崩效应,使材料中的非平衡载流子成倍增加。2013年,George M^[18]使用MBE在InP衬底上生长晶格匹配的InGaAs和InAlAs合金,利用合金成分、外延层厚度和掺杂的变化来调制载流子能量,最大限度地实现电致冲击

电离,同时最小化空穴电离。在等效输出信号增益下,APD显示出低噪声和更低的暗电流。2016年,孙剑峰等^[13]在InGaAs雪崩光电探测器的基础上,构建了一套1570 nm激光主动成像实验平台,由APD光电探测器内部电路接收回波并直接输出数字信号,使得整套装置结构紧凑,实验结果如图2(d)、(e)所示。图2(d)是成像目标的实物照片,图2(e)是三维距离像,可以明显看出c区的窗户区,和a、b区有一定的纵深距离。该平台实现了脉宽小于10 ns、单脉冲能量(1~3) mJ可调,收发镜头视场角为2°,重复频率为1 kHz,探测器占空比约60%。得益于APD的内部光电流增益、快速响应、紧凑尺寸、耐久性和低成本,APD光电探测器在探测率上可以比PIN光电探测器高一个数量级,所以目前主流激光雷达主要以雪崩光电探测器为主。

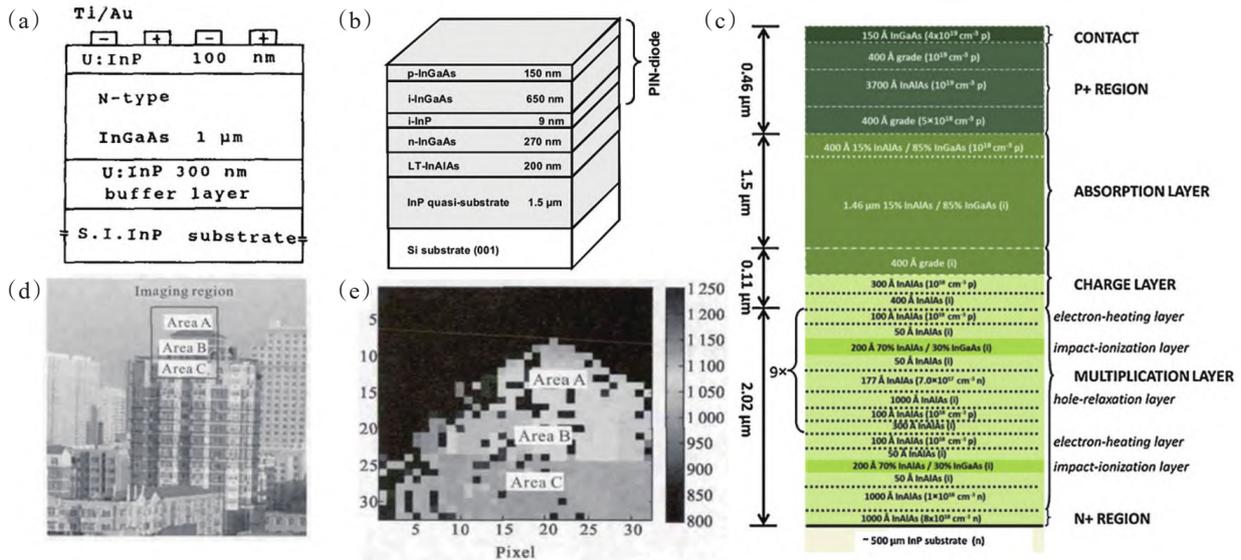


图2 (a)InGaAs MSM光电探测器结构;(b)InGaAs PIN光电探测器结构;(c)InGaAs雪崩光电探测器结构;
(d)目标图片;(e)32×32像素APD图像

整体来看,随着国内外InGaAs制备技术的飞速发展,已经可以熟练地使用MBE、MOCVD、LPE等技术,在InP衬底制备大面积高质量的InGaAs外延层。InGaAs光电探测器表现出较低的暗电流和较高的响应度,最低暗电流已低于0.75 pA/μm²,响应度最大可达0.57 A/W,且具有较快的瞬态响应(ps量级)。未来InGaAs光电探测器发展会集中在以下两个方面:(1)在Si衬底上直接生长InGaAs外延层,目前市场微电子器件大部分都是Si基,后续InGaAs与Si基的集成发展是大势所趋,解决晶格失配、热膨胀系数差异等问题,对于研究InGaAs/Si至关重要;(2)1550 nm波长技术已经成熟,延伸波长(2.0~2.5) μm是未来的研究方向,随着In组分的增加,InP衬底与InGaAs外延层之间的晶格失配会导致更严重的位错和缺陷,因此需要优化器件工艺参数,减小晶格缺陷,降低器件暗电流。

3 单光子 InGaAs 光电探测器

随着激光雷达的飞速发展,用于自动驾驶跟踪成像技术的光探测技术和测距技术^[19]也有了更高的要求,传统的弱光检测技术中所用到的探测器的灵敏度和时间分辨率不能满足实际需求。单光子是不可分割的最小能量单元,具有单光子探测能力的探测器是弱光探测的最终工具。与InGaAs APD相比,基于InGaAs APD的单光子探测器具有更高的响应速度、灵敏度和效率^[20-21]。因此,国内外对于InGaAs APD单光子探测器展开了一系列的研究。

意大利米兰大学的研究人员首先在1997年^[22]开发了一个二维模型模拟单光子雪崩光电探测器的瞬态行为,给出了单光子雪崩光电探测器的瞬态特性数值模拟结果。随后在2006年^[23],研究人员使用MOCVD制备了平面几何结构的InGaAs APD单光子探测器,通过减小反射层,增强异质界面处电场,将单光子探测效率提高到10%。2014年^[24],进一步通过改善锌扩散条件和优化垂直结构,使得单光子探测器具有更高的探测效率,可达30%,实现约87 ps的定时抖动。2016年^[25],SANZARO M等将InGaAs APD

单光子探测器与单片集成电阻器集成,设计了一种基于该探测器的紧凑型单光子计数模块,并提出混合猝灭方法,显著降低了雪崩电荷,从而降低了后脉冲和光串扰,将定时抖动降低至 70 ps。与此同时,其他研究小组也相继对 InGaAs APD 单光子探测器进行了研究,如 Princeton Lightwave 公司^[26]采用平面结构设计了 InGaAs/InP APD 单光子探测器并投入商用;上海技术物理研究所^[27]使用去除锌堆积层,并利用电容平衡门脉冲模式测试了 APD 的单光子性能,当脉冲频率为 1.5 MHz 时,暗计数为 $3.6 \times 10^{-4}/\text{ns pulse}$ 。Joseph P 等设计了带隙更宽的台面结构 InGaAs APD 单光子探测器,使用 InGaAsP 作为吸收层材料,在不影响探测效率的前提下,获得了更低的暗计数。

InGaAs APD 单光子探测器工作模式是自由运转模式,即 APD 在发生雪崩后需要外围电路猝灭,并在猝灭一段时间后恢复。为了减小猝灭延迟时间带来的影响,大概分为两种类型:一种是采用被动猝灭或主动猝灭电路实现猝灭^[28-29],例如 R T Thew 等^[29]采用有源猝灭电路,图 3(a)、(b)是电子控制和主动猝灭电路及其与 APD 连接的简化示意图,该电路已开发为在选通或自由运行模式下工作,显著减少了先前无法实现的后脉冲问题,而且在 1 550 nm 的探测效率为 10%,后脉冲概率降低到小于 1%;第二种是依靠控制偏置电压的高低实现快速猝灭和恢复,由于不依赖雪崩脉冲的反馈控制,所以明显减小了猝灭的延迟时间,提高了探测器的探测效率,例如 L. C. Comandar 等^[30]使用门控模式,制备了一种基于 InGaAs/InP APD 的选通单光子探测器,单光子探测效率在 1 550 nm 处超过 55%,并且实现了 7% 的后脉冲概率。在此基础上,中国科学技术大学^[31]使用多模光纤同时耦合自由模式的 InGaAs APD 单光子探测器,搭建了激光雷达系统,实验装置如图 3(c)、(d)所示,实现了对高度为 12 km 的多层云的探测,时间分辨率为 1 s,空间分辨率为 15 m。

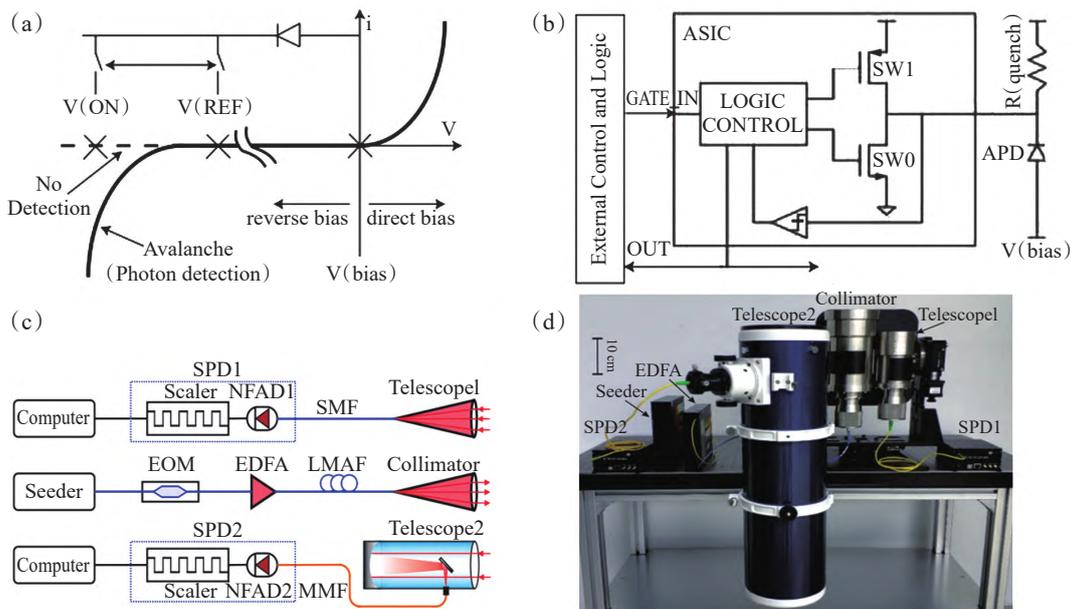


图3 (a)APD 的电压电流图;(b)电子控制和主动猝灭电路及其与 APD 连接的简化示意图;
(c)自由运行 InGaAs/InP 激光雷达实验装置;(d)InGaAs/InP 激光雷达实物照片

4 InGaAs 焦平面光电探测器

近年来,国内外研究机构在短波红外 InGaAs 焦平面探测领域开展了大量研究。国外对于 InGaAs 红外焦平面器件的研究起步比较早,许多厂商都已经拥有成熟的系列产品。例如作为行业的领导者,美国 SUI 公司于 2003 年首次推出了高性能的焦平面探测器,2009 年该公司在 DARPA 项目^[32]支持下做到 640×512 面阵,光敏元间距为 20 μm ,并且通过移除 InP 衬底,响应波长范围拓宽到 $(0.4 \sim 1.7) \mu\text{m}$,暗电流降低到 2 nA/cm²。美国 FLIR 公司^[33]最大面阵现已达到 1920×1280 ,主线产品覆盖 320×256 、 640×512 和 1280×1024 等多种规格。美国 Raytheon^[32]、Teledyne 公司^[34]也掌握了中心距 15 μm 的 1280×1024 像元近红外 InGaAs 焦平面技术,并开展 10 μm 光敏元的焦平面技术以及 4 英寸 InGaAs 晶圆制备技术的研

究。现阶段,除了美国在这方面的高速发展,其他国家也先后跟进此技术的研究以及产品开发,比利时的XenICs公司^[35]已经成功完成了中心距17 μm像元1280×1024规格的研究,德国IAF^[36]、加拿大Banpil公司^[37]、英国Photonic Science Limited、法国Sofradir^[38]、NIT公司^[39]、以色列SCD公司等也长期致力于InGaAs焦平面探测器的研制和应用。图4(a)为美国FLIR公司FLIR A6260短波红外热像仪,配备InGaAs 640×512像元焦平面探测器,图4(b)为美国Teledyne公司线扫相机Linea SWIR 1k,1024×1像元线列焦平面,图4(c)是比利时的XenICs公司Wildcat 640,分辨率为640×512像素,最高帧频可达220 Hz。

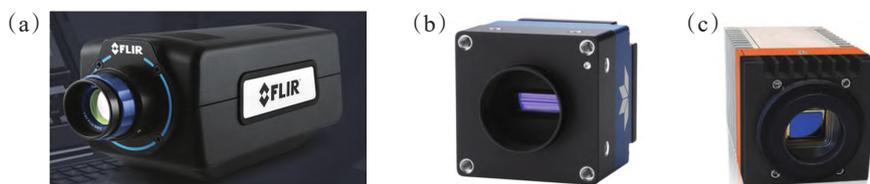


图4 (a)美国FLIR A6260; (b)美国Teledyne Linea SWIR 1k; (c)比利时XenICs Wildcat 640

国内研究 InGaAs 焦平面探测器的机构主要包括中国科学院上海技术物理研究所、中国电子科技集团44所^[40]、昆明物理研究所等。其中,中科院上海技术物理研究所在高灵敏度常规波长(0.9~1.7) μm InGaAs焦平面、延伸波长(1.0~2.5) μm InGaAs焦平面以及新型多功能InGaAs探测器取得了良好进展。2006年,常规波长InGaAs焦平面从256×1^[41]、512×1、800×2等小线列开始,到2012年,研制了成像用30 μm中心距的320×256面阵^[42],2017年研制出25 μm中心距的640×512面阵^[43],到2018年已研制出15 μm中心距的1280×1024元焦平面探测器^[44],研制的1280×1024元组件的平均峰值探测率达 $5.3 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$,盲元率小于1%,非均匀性为6.4%,如图5(a)所示。目前,中科院上海技物所已实现了800×2、320×256、640×512、1024×128、4000×128等多个规格的近红外InGaAs探测器组件^[45],并且已经通过了相关可靠性试验。2006年,中国电子科技集团44所首次发布了规格为128×128InGaAs焦平面光电探测器,40 μm中心距,2009年,研制出320×256元,中心距30 μm的InGaAs焦平面,典型平均峰值探测率达 5.0×10^{12} Jones水平,随后在2015年、2016年,发布了规格为640×512焦平面探测器,并将中心距从25 μm减小到15 μm^[46],如图5(b)所示,中电44所已实现多种规格的产品供应。

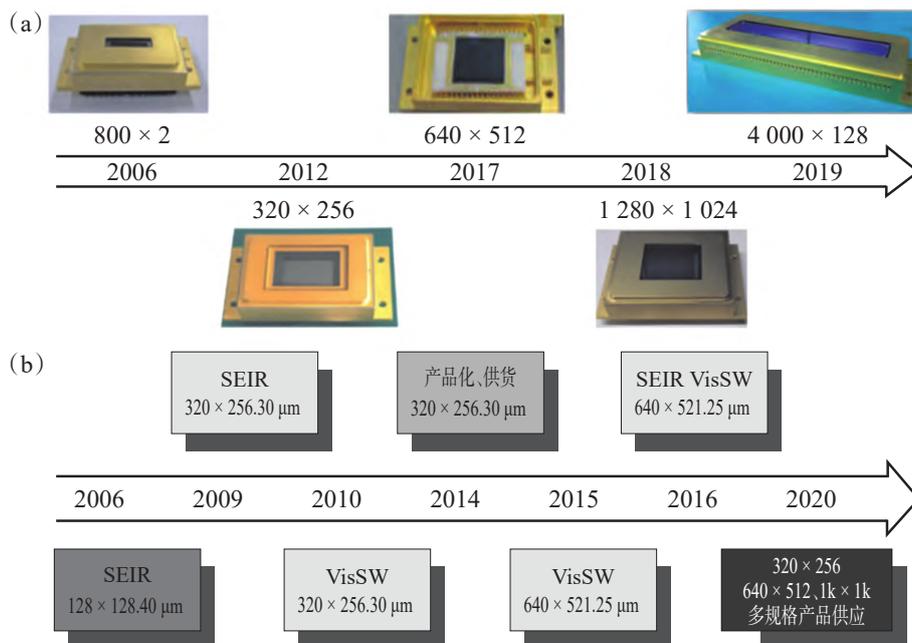


图5 (a)中国科学院上海技术物理研究所近红外InGaAs焦平面探测器技术发展历程;
(b)中电44所InGaAs焦平面探测器技术发展历程

InGaAs焦平面探测器技术优越、性能优良,已在激光雷达、军用夜视等领域发挥了重要的作用,具有

很高的应用价值,如高识别度、强天气适应度,而且因为夜间大气辉光辐亮度主要分布在 $(1.0 \sim 1.8) \mu\text{m}$ 的波段范围内,所以InGaAs焦平面探测器在微光夜视中拥有独特的优势。未来InGaAs焦平面探测器的发展将会集中在以下几个方面:首先,很多公司都拥有 1280×1024 规模的面阵,像元间距也减小到 $15 \mu\text{m}$,未来会向着更大面阵和更长线阵的大方向发展;其次,随着红外成像系统与功耗等要求的提高,非制冷型探测器已经成为一个发展趋势,这要求器件在室温下的暗电流噪声越来越低;最后,对于InGaAs阵列来说,为了获取更丰富、更精准、更可靠的目标信息,多波段工作将是未来趋势。

5 商用 InGaAs 激光雷达光电探测器

目前InGaAs激光雷达行业内主要的公司包括美国的Velodyne^[47]、Luminar、Aeva、Ouster,以色列的Innoviz、德国的Ibeo以及国内的速腾聚创,其中大部分品牌的激光雷达都采用了905 nm半导体激光器发射激光脉冲,Velodyne和Innoviz使用的就是905 nm。但是905 nm太接近人眼可见光谱,以至于限制了激光强度和激光功率,从长远看,使用InGaAs的1550 nm激光雷达更具有优势,1550 nm属于人眼安全波长,可以增大功率,增加探测距离和点云分辨率,在空旷的区域可以看得更远,在复杂的区域可以看得更宽,更适用于未来的无人驾驶或汽车辅助驾驶系统。在1550 nm激光雷达方面,Luminar是领军人物,与此同时,镭神智能、华为和昂纳科技也紧随其后,并各自发布了自主研发的1550 nm激光雷达。

Luminar一直专注于研究高性能InGaAs接收器,可用于探测Luminar激光雷达系统所特有的波长为1550 nm激光,并在2018年收购了美国芯片设计商Black Forest Engineering。2020年,Luminar正式发布1550 nm激光雷达Iris,如图6(a)所示,获得了高于905 nm激光器40倍的激光脉冲强度。超强的功率使其激光雷达的探测范围扩大了10倍,最远可达600 m,分辨率提高了50倍。沃尔沃汽车宣布将搭载Luminar激光雷达,改进无人驾驶辅助系统^[48]。

国内镭神智能同样开始自主研发核心驱动集成和接收端集成激光雷达专用芯片,人眼安全的混合固态激光雷达($\lambda = 1550 \text{ nm}$),目前,镭神智能已针对汽车前装市场开发了LS21G混合固态激光雷达,如图6(b)所示,采用1550 nm光源,250 m处可探测到5%反射率的目标,视场角 $120^\circ \times 25^\circ$,拥有更好的测距性能和点云密度表现。

2020年7月,华为发布96线中长距激光雷达产品^[49],如图6(c)所示。和Luminar类似,96线中长距激光雷达采用1550 nm激光,探测距离是150 m,大视野 $120^\circ \times 25^\circ$,可以实现城区行人车辆检测覆盖,更符合中国复杂路况下的场景。而且96线中长距激光雷达采用多个发射和接收组件,成功地提高了有效距离和视场角,在目标轮廓测量、角度测量、光照稳定性、通用障碍物检出等方面都具有极佳的能力。

2021年12月,昂纳科技也发布了一款1550 nm激光雷达Dolphin,如图6(d)。Dolphin是采用DToF模式的混合固态激光雷达,添加了实时自动光学变焦功能,探测距离250 m,视野扩大到 $120^\circ \times 30^\circ$,最高分辨率0.05°,各项性能均有所提高。

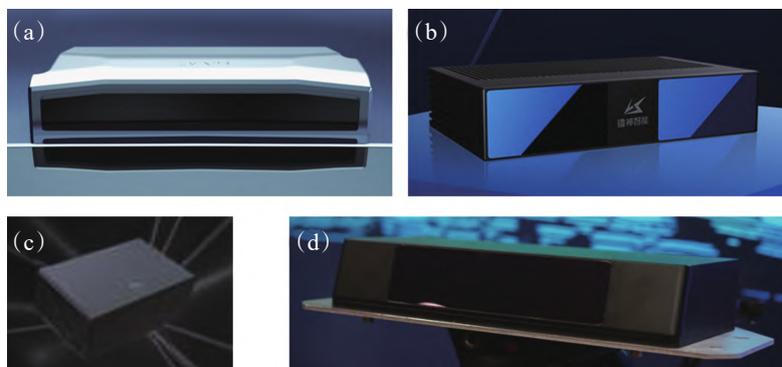


图6 (a)Luminar激光雷达Iris;(b)镭神智能LS21G;(c)华为96线中长距激光雷达;
(d)昂纳科技Dolphin 1550 nm激光雷达

6 结束语

综上所述,本文就InGaAs光电探测器器件结构、InGaAs焦平面探测器、商用激光雷达的基本发展现状进行了综述。从结构看,单光子光电探测器具有更高的响应速度、更高的灵敏度和更高的效率,已经成为激光雷达的首选。为了获得丰富准确的信息,焦平面阵列向着更大面阵和更长线阵的方向飞速发展。目前,InGaAs 1 550 nm激光雷达主要应用于汽车行业无人驾驶和服务行业智能机器人,智能化已经成为汽车行业的重要发展趋势,但是技术上还需要进一步优化,高成本也是限制激光雷达发展的一大障碍。从短期看,需要尽快提高激光雷达产品性能,在稳定、安全等方面提出了更高要求;从长期看,降低成本和增加量产规模,是激光雷达商业化不得不解决的问题。总之,激光雷达应用价值显著,具有广阔的应用前景,在无人化、智能化方面发挥着无可替代的作用。

参考文献:

- [1] WILLIAMS G M. Optimization of eyesafe avalanche photodiode lidar for automobile safety and autonomous navigation systems[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 031224.
- [2] LEONARD J, HOW J, TELLER S, et al. A perception-driven autonomous urban vehicle[J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(10): 727-774.
- [3] HU C S, HUANG Z S, QIN S Q, et al. A new 3D imaging lidar based on the high-speed 2D laser scanner[C]//*Proceedings of the Conference on Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology II*. Spie-Int Soc Optical Engineering: BELLINGHAM, 2012.
- [4] GLECKLER A D, GELBART A, BOWDEN J M. Multispectral and hyperspectral 3D imaging lidar based upon the multiple slit streak tube imaging lidar[J]. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4377: 328-335.
- [5] LIU D, SHANGGUAN M, XIA H, et al. Development of multifunction micro-pulse lidar at 1.5 micrometer[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 237.
- [6] SEETAMRAJU M, GURJAR R, SQUILLANTE M, et al. Hybrid lidar radar receiver for underwater imaging applications[C]. *Proceedings of the Conference on Optics and Photonics in Global Homeland Security V/Biometric Technology for Human Identification VI*, 2009.
- [7] MAYOR S D, SPULER S M. Raman-shifted eye-safe aerosol lidar[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(19): 3915-3924.
- [8] SAITO Y, KURATA H, KURUSHIMA H, et al. Experimental discussion on eye-safe 1.54 μm photon counting lidar using avalanche photodiode[J]. *Optical Review*, 2004, 11(6): 378-384.
- [9] 李庆法. InGaAs探测器的光电性能仿真与结构优化研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.
- [10] 郝国强. InGaAs红外探测器器件与物理研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所), 2006.
- [11] 韩丽丽. InGaAs/AlGaAs红外发光二极管的制备及性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2021.
- [12] 闫欣. 大面积InGaAs-MSM光电探测器研制及其暗电流特性分析[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2015.
- [13] 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.
- [14] SASAKI T, ENOKI T, TACHIKAWA M, et al. InAlAs/InGaAs metal-semiconductor-metal photodiodes heteroepitaxially grown on Si substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(6): 751-753.
- [15] POLOCZEK A, WEISS A, FEDDERWITZ S, et al. Integrated InGaAs pin-diode on exactly oriented silicon (001) substrate suitable for 10 Gbit/s digital applications[C]. *Proceedings of the 20th Annual Meeting of the IEEE-Lasers-and-Electro-Optics-Society*, Lake Buena Vista, 2007.
- [16] TURNER M D, STANN B L, KAMERMAN G W, et al. Brassboard development of a MEMS-scanned lidar sensor for small ground robots [Z]. *Laser Radar Technology and Applications XVI*, 2011.10.1117/12.884478.
- [17] MOSS R, YUAN P, BAI X, et al. Low-cost compact MEMS scanning lidar system for robotic applications[Z]. *Laser Radar Technology and Applications XVII*, 2012.10.1117/12.919804.
- [18] WILLIAMS G M, COMPTON M, RAMIREZ D A, et al. Multi-gain-stage InGaAs avalanche photodiode with enhanced gain and reduced excess noise[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2013, 1(2): 54-65.
- [19] 迟进梓. 伪随机码调制的光子计数激光雷达测距系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [20] JIANG X, ITZLER M A, BEN-MICHAEL R, et al. InGaAsP-InP avalanche photodiodes for single photon detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4): 895-905.
- [21] RAZEGHI M, ITZLER M A, SUDHARSANAN R, et al. InP-based negative feedback avalanche diodes[Z]. *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VI*, 2009.10.1117/12.814669.
- [22] SPINELLI A, LACAITA A L. Physics and numerical simulation of single photon avalanche diodes[J]. *IEEE Trans Electron Devices (USA)*, 1997, 44(11): 1931-1973.

- [23] PELLEGRINI S, WARBURTON R E, TAN L J J, et al. Design and performance of an InGaAs-InP single-photon avalanche diode detector [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(4): 397-403.
- [24] TOSI A, CALANDRI N, SANZARO M, et al. Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 192-198.
- [25] SANZARO M, CALANDRI N, RUGGERI A, et al. InGaAs/InP SPAD with monolithically integrated zinc-diffused resistor[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(7): 1-7.
- [26] DONNELLY J P, DUERR E K, MCINTOSH K A, et al. Design considerations for 1.06 μm InGaAsP-InP geiger-mode avalanche photodiodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(8): 797-809.
- [27] 曾巧玉. InGaAs/InP单光子雪崩光电二级管的制备及研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2014.
- [28] LIU J, XU Y, LI Y, et al. Exploiting the single-photon detection performance of InGaAs negative-feedback avalanche diode with fast active quenching[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10150-10161.
- [29] THEW R T, STUCKI D, GAUTIER J D, et al. Free-running InGaAs/InP avalanche photodiode with active quenching for single photon counting at telecom wavelengths [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(20): 201114.
- [30] COMANDAR L C, FRÖHLICH B, DYNES J F, et al. Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1 550 nm[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(8): 083109.
- [31] YU C, QIU J, XIA H, et al. Compact and lightweight 1.5 μm lidar with a multi-mode fiber coupling free-running InGaAs/InP single-photon detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 103106.
- [32] ACTON D, JACK M, SESSLER T. Large format short-wave infrared (SWIR) focal plane array (FPA) with extremely low noise and high dynamic range [J]. *Proceedings of the SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7298: 72983E.
- [33] HOOD A D, MACDOUGAL M H, MANZO J, et al. Large-format InGaAs focal plane arrays for SWIR imaging[C]. *Proceedings of the Conference on Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012.
- [34] YUAN H, MEIXELL M, ZHANG J, et al. Low dark current small pixel large format InGaAs 2D photodetector array development at teledyne judson technologies [C]. *Proceedings of the Conference on Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012.
- [35] VERECKEN W, VAN BOGGET U, COLIN T, et al. A low noise, extended dynamic range 1.3 megapixel InGaAs array [C]//*Proceedings of the Conference on Infrared Technology and Applications XXXIX*. *Spie-Int Soc Optical Engineering*: BELLINGHAM, 2013.
- [36] RUTZ F, KLEINOW P, AIDAM R, et al. InGaAs infrared detector development for SWIR imaging applications[C]//*Proceedings of the Conference on Electro-Optical and Infrared Systems - Technology and Applications X*. *Spie-Int Soc Optical Engineering*: BELLINGHAM, 2013.
- [37] NAGI R, BREGMAN J, MIZUNO G, et al. Development of high performance SWIR InGaAs focal plane array[C]. *Proceedings of the Conference on Image Sensing Technologies - Materials, Devices, Systems, and Applications II*, 2015.
- [38] ROUVIE A, COUSSEMENT J, HUET O, et al. InGaAs focal plane array developments and perspectives[C]. *proceedings of the Conference on Electro-Optical and Infrared Systems - Technology and Applications XI*, 2014.
- [39] NI Y, ARION B, ZHU Y M, et al. Toward a single-chip TECless and nucless InGaAs SWIR camera with 120 dB intrinsic operation dynamic range[C]. *Proceedings of the Conference on Infrared Technology and Applications XXXVII*, 2011.
- [40] GAO X-J, TANG Z-L, ZHANG X-C, et al. Short wave infrared InGaAs focal plane arrays detector: the performance optimization of photosensitive element[J]. *Proceedings of the SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7383: 73832S.
- [41] LI X, SHAO X M, TANG H J, et al. Inoperable pixels of 256×1 element linear In GaAs near-infrared focal plane arrays[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(5): 409-U140.
- [42] LI X, HUANG S L, CHEN Y, et al. Noise characteristics of short wavelength infrared InGaAs linear focal plane arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(6): 5.
- [43] SHAO X M, BO Y, HUANG S L, et al. 640×512 pixel InGaAs FPAs for short-wave infrared and visible light imaging[C]//*Proceedings of the Conference on Infrared Sensors, Devices, and Applications VII*. *Spie-Int Soc Optical Engineering*: BELLINGHAM, 2017.
- [44] LI X, GONG H, FANG J, et al. The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 80: 112-120.
- [45] 邵秀梅, 龚海梅, 李雪, 等. 高性能短波红外InGaAs焦平面探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2016, 38(8): 629-635.
- [46] 刘军华, 高新江, 周勋. 短波红外InGaAs焦平面探测器的技术进展[J]. *半导体光电*, 2015, 36(5): 683-690.
- [47] 金一丹. 汽车智能化力促激光雷达产业规模化发展[N]. *投资快报*, 2022-01-06.
- [48] 沃尔沃汽车将搭载Luminar激光雷达感知技术[J]. *汽车与配件*, 2020(9): 18.
- [49] 高驰. 被马斯克唱衰的激光雷达, 最近又火了[J]. *汽车与配件*, 2021(1): 46-52.