

## 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展

李雪<sup>1,2\*</sup>, 龚海梅<sup>1,2\*</sup>, 邵秀梅<sup>1,2</sup>, 李涛<sup>1,2</sup>, 黄松垒<sup>1,2</sup>, 马英杰<sup>1,2</sup>, 杨波<sup>1,2</sup>,  
朱宪亮<sup>1,2</sup>, 顾溢<sup>1,2</sup>, 方家熊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 围绕新一代遥感探测仪器应用需求, 中国科学院上海技术物理研究所在短波红外 InGaAs 焦平面探测器领域取得了一系列进展。通过低缺陷外延材料、焦平面芯片制备工艺和低噪声读出电路技术研究, 研制实现了最大规模达 2560×2048 元的 10 μm 中心距 1~1.7 μm InGaAs 焦平面探测器, 峰值探测率优于 1.0×10<sup>13</sup> cmHz<sup>1/2</sup>/W, 有效像素率达到 99.7%; 研制实现了 1280×1024 元 15 μm 中心距的 1~2.5 μm 延伸波长探测器, 峰值探测率优于 5.0×10<sup>11</sup> cmHz<sup>1/2</sup>/W; 发展了新体制新结构器件, 研制了单片集成 4 向偏振功能的 160×128 元偏振焦平面探测器, 消光比优于 37:1; 研制了 64×64 元盖革雪崩焦平面探测器, 时间分辨率达到 0.8 ns。

**关键词:** 铟镓砷; 焦平面; 短波红外; 暗电流; 偏振探测; 雪崩倍增

中图分类号: TN215

文献标识码: A

## Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays

LI Xue<sup>1,2\*</sup>, GONG Hai-Mei<sup>1,2\*</sup>, SHAO Xiu-Mei<sup>1,2</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>, HUANG Song-Lei<sup>1,2</sup>, MA Ying-Jie<sup>1,2</sup>,  
YANG Bo<sup>1,2</sup>, ZHU Xian-Liang<sup>1,2</sup>, GU Yi<sup>1,2</sup>, FANG Jia-Xiong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** To meet with the ongoing demand for the development of higher performance space remote sensing instruments, a series of progress in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays (FPAs) has been achieved in Shanghai Institute of Technical Physics. Through the continuous research efforts devoted to the low-defect density epitaxial materials, the FPA processing technologies as well as the low noise read-out circuits, a 10-μm-pitch 1~1.7 μm InGaAs FPA with an array format up to 2560×2048, a pixel operability up to 99.7% and a high peak detectivity up to 1.0×10<sup>13</sup> cmHz<sup>1/2</sup>/W is realized. A 15-μm-pitch 1~2.5 μm extended wavelength InGaAs FPA with an array format of 1280×1024 and a high peak detectivity up to 5.0×10<sup>11</sup> cmHz<sup>1/2</sup>/W is also achieved. New principle FPA detectors are also developed, which are a monolithic integrated four-direction polarized 160×128 InGaAs FPA with a high extinction ratio up to 37:1, and a 64×64 InGaAs Geiger-mode avalanche FPA with a fine timing resolution down to 0.8 ns.

**Key words:** InGaAs, focal plane array, short wavelength infrared, dark current, polarization detection, avalanche multiplication

收稿日期: 2021-12-30, 修回日期: 2022-01-19

Received date: 2021-12-30, Revised date: 2022-01-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62175250, 62075229); 国家自然科学基金青年项目(62104238); 上海市科技重大专项(2019SHZDZX01); 上海市优秀学术带头人计划(21XD1404200); 上海市学术科技启明星计划(21QA1410600)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62175250, 62075229 and 62104238); the Shanghai Municipal Science and Technology Major Project (2019SHZDZX01); the Program of Shanghai Academic Research Leader (21XD1404200); the International Science and Technology Cooperation Program of Shanghai (20520711200).

作者简介 (Biography): 李雪 (1976—), 女, 辽宁义县人, 研究员, 博士, 主要研究领域为短波红外探测器、红外组件集成技术等, E-mail: lixue@mail.sitp.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: lixue@mail.sitp.ac.cn; hmgong@mail.sitp.ac.cn

## 引言

短波红外光电材料与器件具有高性能、高可靠性、低功耗、低成本等显著优点,可广泛应用于智慧城市、驾驶视觉增强、安防监控、光伏芯片检测、光谱检测以及航天航空等诸多领域,具有重大的科学价值和经济效益。基于 III-V 族 InP/InGaAs 材料体系的短波红外 InGaAs 探测器,具有高灵敏度、高均匀性、高稳定性等特点,具备室温或近室温工作优势,是发展小型化、低功耗和高可靠性短波红外光电系统的理想选择之一。短波红外 InGaAs 焦平面探测器的标准响应波段为 0.9~1.7  $\mu\text{m}$ ,可拓展至可见光波 0.4  $\mu\text{m}$ ,也可延伸至 2.5  $\mu\text{m}$ 。

国际上自 20 世纪 90 年代开始开展 InGaAs 线列探测器研究,从早期面向 1310/1550 nm 应用的通讯波段 PIN 单元器件开始,逐步发展到 256 $\times$ 1 线阵器件。自 2000 年以来,在高性能 InGaAs 短波红外焦平面探测器方面开展大量研究,InGaAs 探测器进入焦平面的快速发展阶段。美国 UTC 航天系统部/Goodrich/传感无限公司,自 2009 年起,先后报道了 640 $\times$ 512 元 25  $\mu\text{m}$ 、1280 $\times$ 1024 元 15  $\mu\text{m}$ 、1920 $\times$ 1080 元 15  $\mu\text{m}$  和 4096 $\times$ 4096 元 5  $\mu\text{m}$  中心距的 InGaAs 焦平面,常规器件波长 1~1.7  $\mu\text{m}$ ,部分器件通过衬底移除技术实现了 0.4~1.7  $\mu\text{m}$  可见-近红外宽光谱响应,暗电流 <0.26 nA/cm<sup>2</sup>@0  $^{\circ}\text{C}$ ,读出噪声 <50 e<sup>-</sup><sup>[1-3]</sup>。以色列 SCD 公司自 2009 年起,也先后报道实现了 640 $\times$ 512 元 15  $\mu\text{m}$  中心距和 1280 $\times$ 1024 元 10  $\mu\text{m}$  中心距的 0.9~1.7  $\mu\text{m}$  百万像素 InGaAs 焦平面,高增益模式下读出噪声小于 35 e<sup>-</sup>,应用于安防和军事领域<sup>[4]</sup>。日本索尼公司于 2020 年推出了基于 III-V 与 IV 族晶圆键合和衬底转移技术方案的 5  $\mu\text{m}$  中心距 1280 $\times$ 1024 元 InGaAs 焦平面,光谱响应范围 0.4~1.7  $\mu\text{m}$ ,在 0.4  $\mu\text{m}$  处的量子效率达到 90%<sup>[5]</sup>。2018 年,美国 Teledyne 报道了 6000 $\times$ 8 元 13  $\mu\text{m}$  中心距的 0.9~1.7  $\mu\text{m}$  超长线列 InGaAs 焦平面,单条焦平面芯片尺寸是目前公开报道的最大尺寸,达 79.3 mm $\times$ 6.8 mm,在 22  $^{\circ}\text{C}$  和 -20 mV 下像素暗电流密度小于 2 nA/cm<sup>2</sup>,读出噪声小于 600 e<sup>-</sup>,应用于航天对地高分辨近红外成像<sup>[6]</sup>。同年,美国 Princeton Infrared 公司报道了光谱响应范围覆盖 0.8~2.05  $\mu\text{m}$  的 1280 $\times$ 1024 元延伸波长 InGaAs 焦平面,中心距 12  $\mu\text{m}$ ,量子效率高于 70%<sup>[7]</sup>。此外,英国的 Photonic Science Limited、法国 Sofradir 公司、比利时的 XenICs 公司、IMEC 研究院等也长期致力于 InGaAs 焦平面

探测器的研制和应用。

自 2010 年起,美国 MIT 林肯实验室、美国 Princeton Lightwave Technology 公司等相继发展了基于 InGaAs 雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode, APD) 的盖革模式 InGaAs 雪崩焦平面<sup>[8-9]</sup>,像素规模 32 $\times$ 32 至 256 $\times$ 64 元,具备计时探测功能,时间分辨率可达 1 ns,可实现主动激光三维成像探测,应用于近红外激光雷达等领域。目前,InGaAs 焦平面探测器正朝向大规模、低噪声、多功能、低功耗和多领域应用方向发展,同时,探测器智能化、集成度持续提升,国内在 InGaAs 材料外延、芯片制造及工程化光电系统研制方面也取得显著进展。

中国科学院上海技术物理研究所围绕航天遥感的应用需求,在 0.9~1.7  $\mu\text{m}$  高灵敏度常规波长 InGaAs 焦平面、1.0~2.5  $\mu\text{m}$  延伸波长 InGaAs 焦平面以及新结构新功能 InGaAs 焦平面方面取得了较快进展。采用分子束外延技术 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 研究了晶格匹配和延伸波长 InGaAs 探测器外延材料结构设计及优化、材料生长机理和均匀性控制<sup>[10]</sup>、InGaAs 焦平面器件物理<sup>[11-13]</sup>、工艺和抗辐照机理等内容,实现了低缺陷 InGaAs 外延材料和高性能焦平面芯片制备。常规波长 InGaAs 焦平面实现了从 512 $\times$ 1 元线列向 1280 $\times$ 1024 元大面阵跨越,中心距从 50  $\mu\text{m}$  逐渐减小至 15  $\mu\text{m}$ ,像素密度、探测率和暗电流水平不断提高。延伸波长 InGaAs 焦平面发展了最大规模达 1024 $\times$ 512 元的大规模焦平面,灵敏度达到  $8\times 10^{11}$  cm $\cdot$ Hz<sup>1/2</sup>/W<sup>[14-16]</sup>。在新体制新功能 InGaAs 探测器方面,通过具有阻挡层结构的新型外延材料和片上集成微纳陷光结构,发展了一种响应波段覆盖 0.4~1.7  $\mu\text{m}$  的可见拓展的宽谱段响应 InGaAs 焦平面,实现了可见波段拓展和较高的量子效率<sup>[17-19]</sup>;发展了片上集成像素级亚波长金属光栅的 InGaAs 偏振焦平面,实现多方向偏振和高消光比<sup>[20-21]</sup>。研制的不同规格短波红外 InGaAs 焦平面探测器,经过航天可靠性验证,已经进入了气象卫星、环境卫星以及深空探测等航天应用中。其中,线列焦平面探测器综合良率实现优于 80%,中小规模面阵焦平面探测器综合良率实现优于 60%。近两年来,中国科学院上海技术物理研究所在响应波长为 1~1.7  $\mu\text{m}$  的 2580 $\times$ 2048 元大面阵、响应波长为 1~2.5  $\mu\text{m}$  的延伸波长 InGaAs 焦平面和可见拓展、偏振集成、单光子雪崩等新体制焦平面等研究方向上分别取得进一步的进展。

### 1 常规波长 InGaAs 焦平面探测器

中国科学院上海技术物理研究所自 2007 年起开展室温近红外 InGaAs 焦平面探测器的研究,取得了一系列重要进展,实现了 800×2、320×256、640×512、1024×128、4000×128、1280×1024、2560×2048 等多个规格的 0.9~1.7 μm 的近红外 InGaAs 探测器,像元中心距从 30 μm 减小到 10 μm,如图 1 所示。

在“十三五”期间,重点研究大阵列材料和器件均匀性控制、高密度小像素探测器的暗电流和噪声抑制、大动态范围低噪声读出电路、百万像素焦平面倒焊互连等内容,详细分析了材料、器件与电路参数对焦平面噪声的影响,研制了国内目前最大规模的 2560×2048 元 InGaAs 焦平面探测器,如图 2 所示,像元中心距为 10 μm,光谱响应范围 0.9~1.7 μm,有效像元率优于 99.7%,响应非均匀性为 3.81%,在 273 K 温度下的峰值探测率优于 1×10<sup>13</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>/W。以此为基础,发展了高密度、小像素系列 InGaAs 焦平面探测器,研制了中心距为 12 μm 的

1280×1024 元 InGaAs 焦平面探测器,集成了数字化功能;研制了中心距为 15 μm 的 640×512 元 InGaAs 焦平面探测器,具备了随机开窗功能;有效像元率优于 99.8%。

由于光生非平衡载流子在 N 型低掺杂浓度 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 吸收层中的扩散长度通常大于 10 μm,随着像素中心距减小,当像素中心距与扩散长度接近或小于扩散长度时,像素间的电学串扰效应将降低焦平面的成像分辨能力<sup>[22, 23]</sup>。本项目团队对平面型 InGaAs/InP 焦平面的串音行为和机理进行了理论研究,研究结果表明,利用 PN 结对光生载流子的侧向收集作用和自限制作用,依据器件工作温度,设计合适的扩散区,有利于提高阵列的填充因子接近 100%,并降低焦平面的串音,光生载流子的侧向收集作用随温度降低而减弱,其原因来自少子扩散长度随温度降低而缩小<sup>[24]</sup>。

采用短波红外 InGaAs 焦平面探测器组件进行了外场成像,如图 3 所示(原始图像,未校正),展示

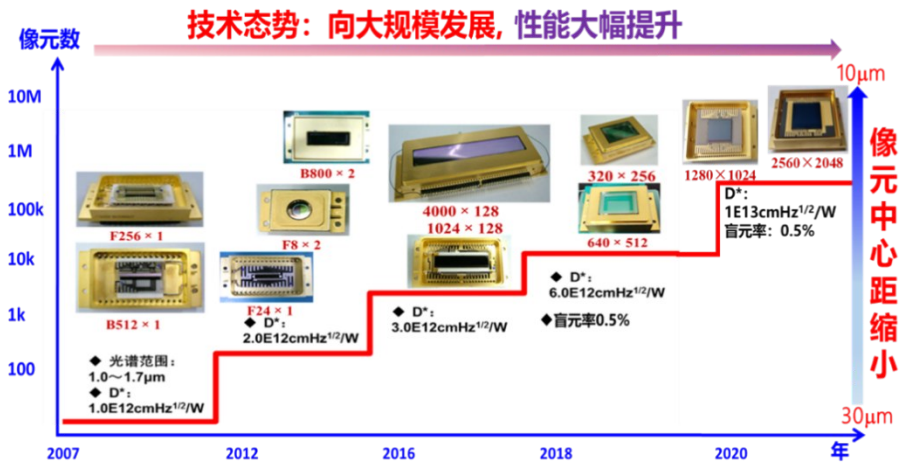


图 1 上海技物所 1.0~1.7 μm InGaAs 常规波长焦平面探测器发展

Fig. 1 The development roadmap of the 1.0~1.7 μm InGaAs FPA detectors in SITP

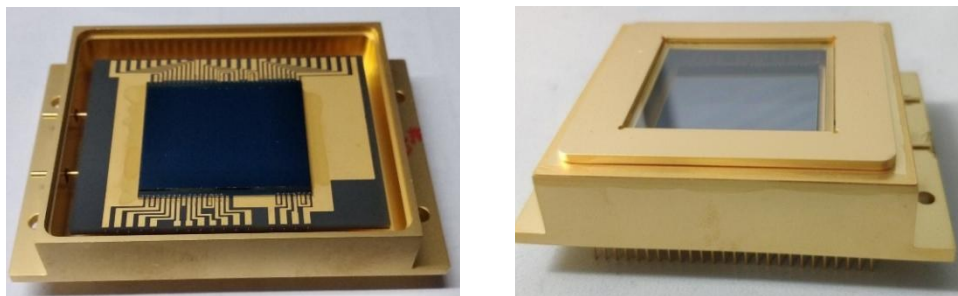


图 2 上海技物所研制的 2560×2048 元 InGaAs 焦平面组件实物照片

Fig. 2 The photographs of the 2580×2048 InGaAs FPA detector assembly in SITP



了距离分别为 1.8 km 和 9.9 km 的大雾中短波红外成像。和可见光照片对比,可以看到,所获得图像清晰,细节丰富,图中也展示了短波红外成像在穿透水雾方面的显著优势,即可清晰辨别大雾场景中的树木、建筑物、电线塔架等。该探测器组件产品预期在安防监控、工业检测、光谱成像等领域具有广阔应用前景。

## 2 可见光拓展宽谱 InGaAs 焦平面探测器

面向微光夜视的应用需求,研究了高量子效率可见-短波红外宽光谱 InGaAs 探测器。探索了制备高量子效率可见-短波红外宽光谱 InGaAs 焦平面探测器的关键工艺及各工艺对器件性能的影响。研究了不同扩散条件下器件的 I-V 特性变化和焦平面的暗噪声变化。最近,提出了采用感应耦合等离子体 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 刻蚀技术实现超薄接触层的精确控制,并成功制备了 160×120 元宽光谱 InGaAs 焦平面器件 (见图 4)<sup>[17]</sup>, 获得了从可

见到短波红外波段 (0.5~1.7  $\mu\text{m}$ ) 整体量子效率超过 60% 的宽光谱高量子效率水平。

为了提升可见-短波红外宽光谱 InGaAs 焦平面探测器的量子效率,探索采用三维全介质材料亚波长结构的增透新方法。针对传统平面型 InGaAs 焦平面探测器,设计了一种亚波长 InP 纳米柱阵列结构,计算模拟了不同结构尺寸对反射率的影响<sup>[18]</sup>。通过多次优化,发现 InP 纳米柱的周期为 600 nm、边长为 360 nm、高度为 200 nm 时, InGaAs 焦平面探测器的反射率最低,在 900~1700 nm 之间平均反射率低至 3.07% (见图 5)。结合 Mie 理论散射模型,分析了 InP 纳米柱阵列宽波段广角度增透的物理机制。对比了不同的微纳结构制备工艺,最终采用电子束曝光 (Electron Beam Lithography, EBL) 技术和感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀技术,制备了表面集成 InP 纳米柱的 160×120 元 InGaAs 焦平面探测器。并对其焦平面性能进行测试,对比了有无 InP 纳米柱阵列的信号电压与量子效率。结果显示,表面集成

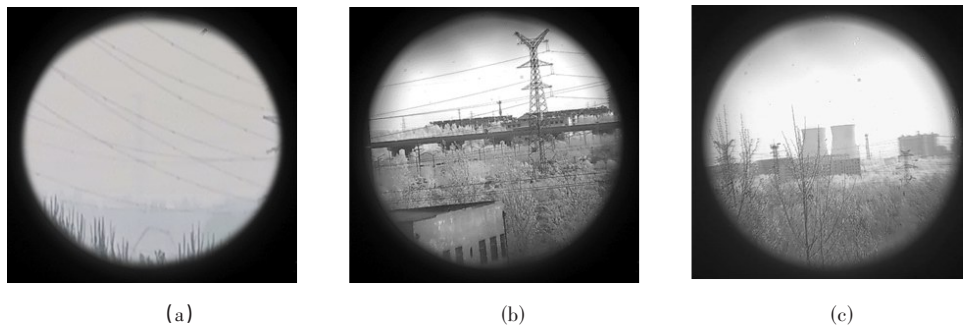


图 3 短波 InGaAs 焦平面组件外场透雾成像验证 (未校正原始图, 2021.4.8, 山东泰安) (a) 可见光照片 (b) 短波红外, 距离 1.8 km (c) 短波红外, 距离 9.9 km

Fig. 3 The imaging demonstration of the SWIR InGaAs FPA under heavy fog (uncorrected raw image, 2021.4.8, Taian in Shandong) (a) visible image, (b) SWIR image, distance 1.8 km, (c) SWIR image, distance 9.9 km

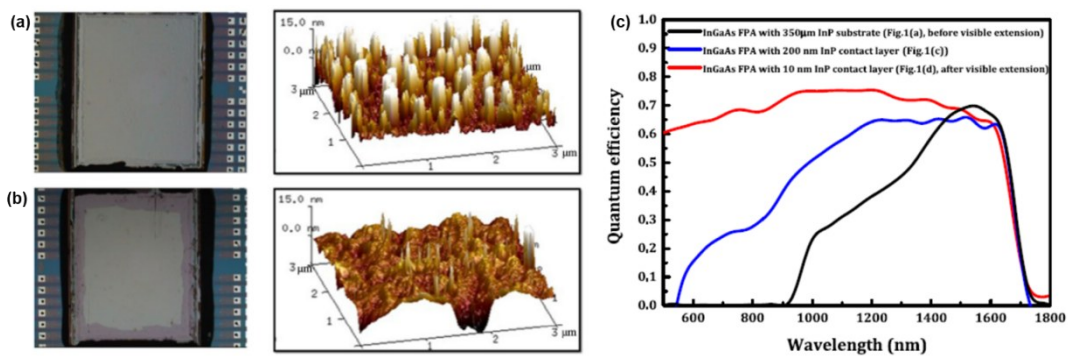


图 4 不同阶段焦平面表面的形貌图: (a) InP 衬底抛光后, (b) ICP 刻蚀至超薄层 InP, (c) 衬底厚度与焦平面量子效率

Fig. 4 The surface morphologies of the FPA during different processing stages: (a) after polishing of the InP substrate, (b) after ICP etching of the thinnest InP layer, (c) the spectral quantum efficiencies vs substrate thickness

InP 纳米柱阵列后, InGaAs 焦平面探测器的量子效率分别为 44.5 % @ 1200 nm、88.0 % @ 1500 nm、90.8 % @ 1600 nm。

为进一步提高人工微纳结构在大面积焦平面可见拓展方面的工艺集成能力,进一步研究发展了一种大面积自组装的胶体纳米球颗粒掩膜工艺,实现在焦平面模块上大面积 InP 纳米柱阵列的制备和集成<sup>[19]</sup>。图 6(a-f)给出了工艺流程图。采用直径 500 nm 的二氧化硅微球作为刻蚀模板,在 InP 材料表面组装成六角密堆的胶体晶体,以实现微纳图案的转移。结合焦平面探测器的特点,采用胶体晶体刻蚀技术在 InGaAs 焦平面器件上集成亚波长结构,

相比 EBL 和纳米压印等工艺,可避免高温工艺和接触式工艺,以确保可见拓展的器件无损伤。采用 FDTD 仿真技术对集成 InP 纳米柱阵列的 InGaAs 探测器进行了原理验证和结构设计,分析了 InP 微纳人工结构宽光谱增透的物理机制。优化了大面积自组装的胶体晶体掩膜工艺,将准周期结构的 InP 纳米柱人工结构集成于 320×256 可见拓展焦平面表面。结果表明,在探测器表面集成微纳人工结构具有宽波段增透的能力,使探测器量子效率增加了 15%~20%。

### 3 延伸波长 InGaAs 焦平面探测器

研制了光敏元中心距 15  $\mu\text{m}$  的背照射 1280×

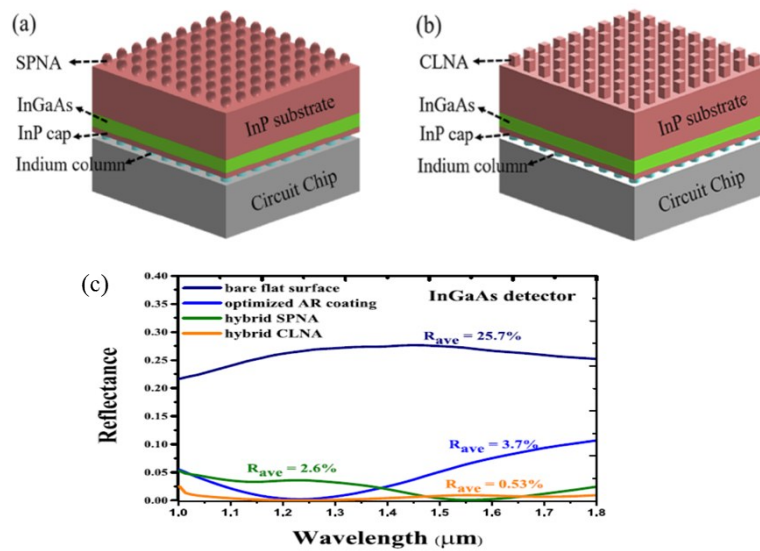


图 5 集成不同表面周期性 MIE 散射结构的 InGaAs 焦平面结构示意图:(a)InP 纳米球,(b)InP 纳米柱,(c)不同结构反射率的仿真计算结果

Fig. 5 The three-dimensional schematic illustration of the InGaAs FPA surfaces integrated with different periodic MIE scattering structures: (a) InP nanosphere, (b) InP nanopillar, (c) the simulated spectral reflectivities of different structures

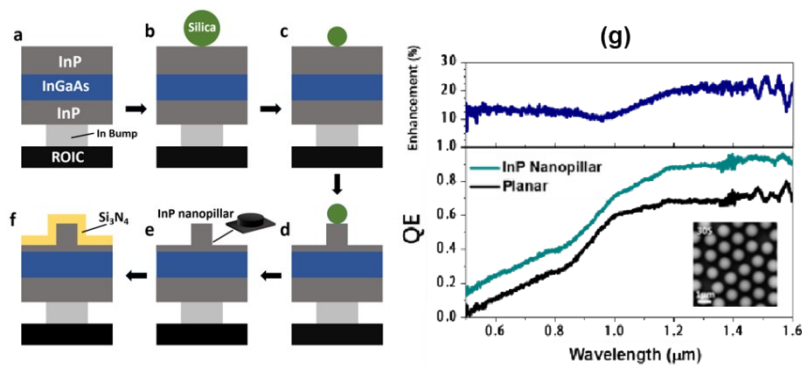


图 6 自组装的胶体纳米球颗粒掩膜工艺流程图:(a)-(f),(g)集成 InP 人工纳米结构的 320×256 可见拓展 InGaAs 焦平面量子效率增强效果

Fig. 6 The processing flow of the self-assembled colloidal nanosphere masks: (a)-(f), (g) the enhanced spectral quantum efficiency of the visible-extended 320×256 InGaAs FPA integrated with the artificial InP surface nanostructures

1024光敏芯片结构,采用高精度的工艺技术,实现高密度窄间隔浅隔槽槽结构;采用低损伤刻蚀台面成型技术<sup>[14, 16]</sup>、低应力钝化技术<sup>[15]</sup>,严格控制光敏芯片面型,获得了平面度PV值小于5  $\mu\text{m}$ 的波长扩展1280×1024光敏芯片,如图7所示。

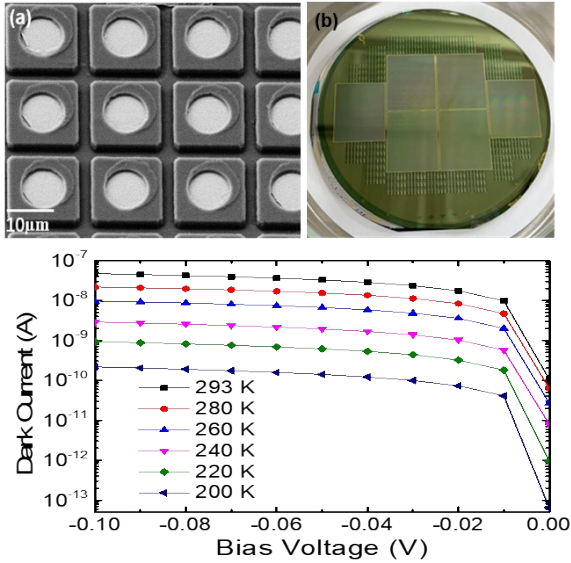


图7 (a)焦平面15  $\mu\text{m}$ 像素微台面结构,(b)完成的3英寸晶圆照片,(c)像元变温暗电流曲线

Fig. 7 (a) The scanning microscope image of the micro-mesa arrays for the 15- $\mu\text{m}$ -pitch FPA, (b) a finished 3-inch FPA wafer, (c) measured temperature-dependent dark current versus reverse bias

发展和设计了大规模探测器读出电路,由单元电路、列处理电路、输出级电路,以及数字脉冲时序电路等组成。由于光敏面尺寸缩小至仅15×15  $\mu\text{m}^2$ ,其面积是原有技术30×30  $\mu\text{m}^2$ 版图面积的25%,MOS管的尺寸宽度和长度、负载电容和采样电容等版图面积都受到苛刻限制。在电路设计中充分发挥了CTIA输入级具有注入效率高、线性度好、带宽大、偏置稳定的优点,同时克服功耗、所占版图

面积大的缺点,将功耗控制在可接受范围内。进一步通过将光敏芯片与读出电路倒焊互连耦合,制备了百万像素延伸波长InGaAs焦平面探测器,响应波段覆盖0.90~2.50  $\mu\text{m}$ ,焦平面在150 K下的平均峰值探测率为5.43×10<sup>11</sup> cmHz<sup>1/2</sup>/W,有效像元率99.37%,响应非均匀性8.4%。图8给出焦平面的响应范围和黑体响应信号统计分布图。

相较于晶格匹配材料体系的1~1.7  $\mu\text{m}$  In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.17</sub>As/InP焦平面,为了进一步提高延伸波长In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP(0.53<x<1)焦平面的工作温度,降低外延材料中的位错缺陷密度以及器件制备过程的工艺损伤,从而降低器件的暗电流是主要途径。

#### 4 片上集成偏振InGaAs焦平面探测器

偏振探测在凸显目标几何结构、材质特征方面具有重要价值,常规偏振成像系统通常采用外置起偏光学元件实现分时偏振探测,难以满足对高速动态目标或平台本身处于快速运动状态下的多偏振度探测识别。而单片集成偏振结构的焦平面探测器,不再需要外置的起偏光学元件,大大简化光学系统,同时通过多偏振方向集成可实现对目标的同时多偏振维度探测,具有更强的目标识别能力。解决片上集成偏振探测核心光电器件的制备问题,其难点在于提高大像元焦平面探测器的灵敏度以及提高偏振消光比<sup>[20-21]</sup>。自2012年提出将亚波长金属结构与探测器像素单片集成,研制超像素集成偏振InGaAs短波红外焦平面以来,重点研究了金属偏振光栅与探测器有效匹配耦合方法,实现四个角度亚波长金属线偏振光栅、增透膜和短波红外InGaAs探测器的片上集成,研制成功了多种规格集成线偏振功能的短波红外InGaAs探测器,如图9所示。

最新研制的单片集成偏振的像素规模为160×128(其中2×2为一个偏振单元)元,像元中心距30  $\mu\text{m}$ ,有效像元率99.2%,平均峰值探测率1.42×10<sup>12</sup>

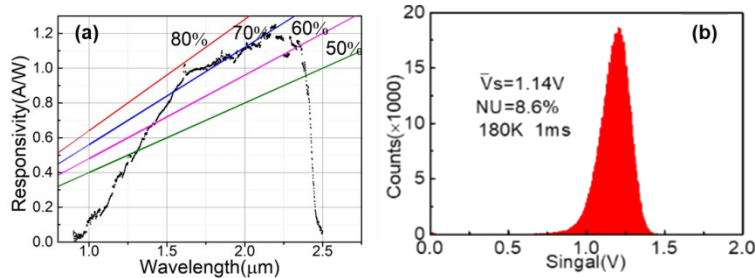


图8 (a)器件响应波长(0.90~2.50  $\mu\text{m}$ ),(b)黑体响应信号统计分布

Fig. 8 (a) Response range of a 1280×1024 InGaAs FPA, (b) the statistical distribution of the blackbody response signal



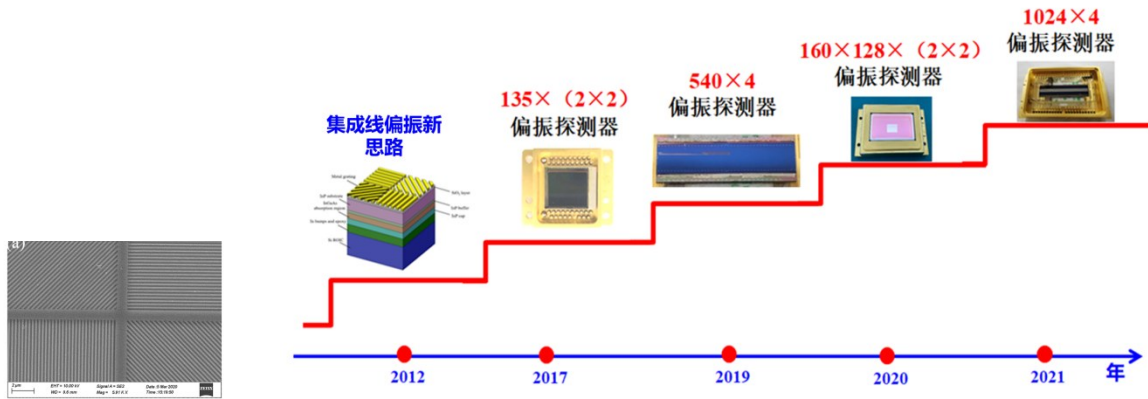


图9 上海技物所集成线偏振的InGaAs短波红外焦平面发展

Fig.9 The development roadmap of the monolithic polarized InGaAs FPA detectors in SITP

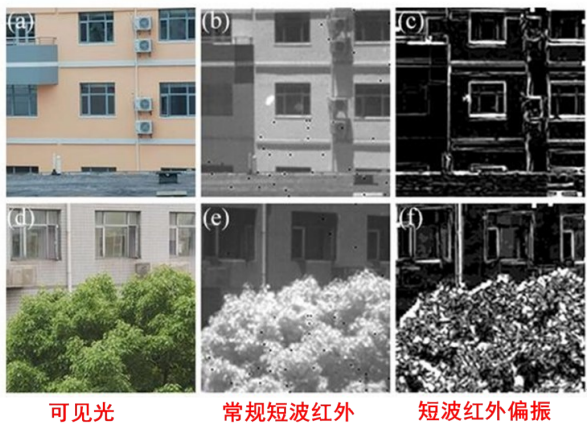


图10 短波红外InGaAs 160×128单片集成线偏振成像效果和常规成像效果对比

Fig. 10 An imaging comparison between the monolithic polarized 160×128 InGaAs SWIR FPA and a non-polarized FPA

cm·Hz<sup>1/2</sup>/W, 在 0°、45°、90° 和 135° 偏振光栅方向上的消光比分别为 36:1、31:1、37:1 和 35:1, 所实现的及消光比等关键指标优于目前国内外的公开报道结果 [25-26]。偏振探测器已在偏振成像原理样机上进行了试用, 形成了短波红外集成偏振成像的能力, 如图 10 所示。

### 5 盖革模式 InGaAs 雪崩焦平面探测器

针对近红外激光三维成像应用需求, 研究发展了盖革模式 InGaAs 雪崩焦平面探测器, 像素规模 64×64 元。采用 InGaAs/InP 雪崩探测器 (APD) 阵列光敏芯片, 与高精度淬灭计时读出电路耦合, 形成精密制冷探测器组件。完成了盖革模式 APD 阵列光敏芯片设计与制备优化技术、盖革模式 APD 输出信号与处理技术、大面积均匀制冷与高精度温控组

装封装技术、激光三维成像机芯技术等研究, 形成盖革模式激光焦平面探测器成像样机, 具备单光子面阵探测、激光主动测距等功能。图 11 给出了 InGaAsP 四元组分吸收层的 InGaAsP/InP 盖革雪崩探测器的线性区光电流和电流测试结果。测试采用激光波长 1064 nm。器件采用 Zn 扩散平面结工艺制备, 通过高精度扩散控制和吸收、倍增、电荷层材料结构, 形成低暗电流、高增益雪崩光电二极管, 典型反向击穿电压约 70 V, 线性区增益系数大于 30, 90% 击穿电压处暗电流约 260 pA (光敏面直径 25 μm)。

通过将光敏芯片与读出电路倒焊耦合, 通过微透镜与模块耦合集成和 TEC 金属管壳封装, 实现大

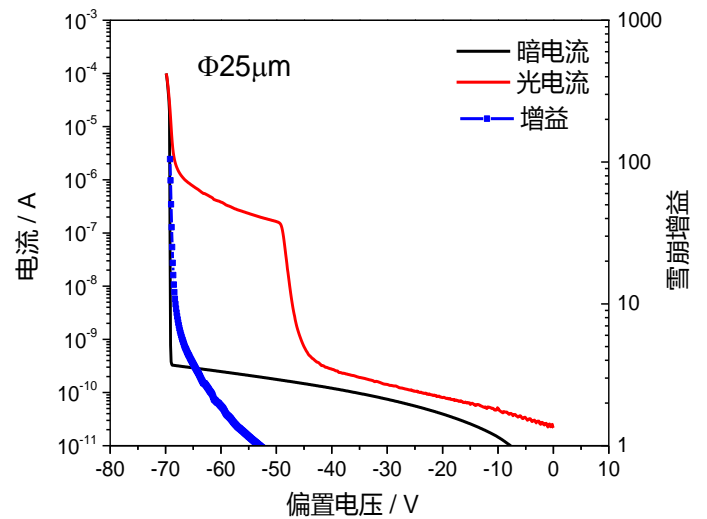


图11 盖革 InGaAsP/InP 雪崩探测器线性 IV 特性测试结果

Fig. 11 The measured reverse dark and light IV curves for the Geiger-mode InGaAsP/InP avalanche photodiode

面积均匀制冷与高精度温控组件封装,形成盖革 InGaAs 焦平面组件,如图 12 所示。组件在真空排气后,形成真空密封状态。芯片制冷温度最低可达  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  下对雪崩焦平面组件进行测试。光源采用  $1064\text{ nm}$  的激光,光强衰减至小于  $0.1$  光子/像素/帧。采集焦平面组件的输出数据并进行统计,探测器的平均单光子探测效率达  $32.3\%$ ,平均暗计数率小于  $18\text{ kHz}$ 。图 13 进一步给出了焦平面探测器

的时间分辨率,即对于到达时间以  $0.8\text{ ns}$  递延的光波信号,组件输出的计时峰值可进行有效分辨,计算时间分辨率达到  $0.8\text{ ns}$ 。

## 6 总结

本文概述了中国科学院上海技术物理研究所近年在短波红外 InGaAs 焦平面探测器领域取得的研究进展,主要涉及响应波长  $1\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$  InGaAs 大面阵、 $0.4\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$  高量子效率可见拓展、 $1.0\sim 2.5$

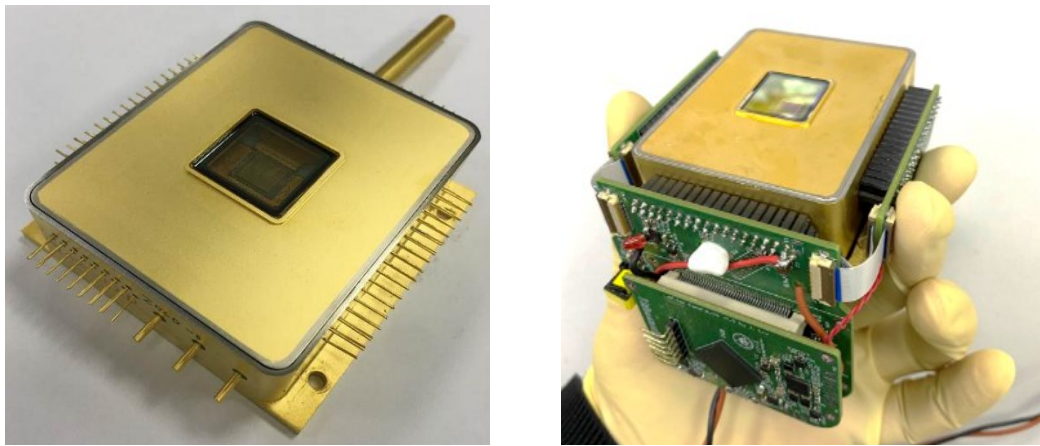


图 12  $64\times 64$  元盖革雪崩焦平面封装组件及机芯

Fig. 12 A  $64\times 64$  Geiger-mode InGaAsP/InP avalanche FPA assembly and an electronics module

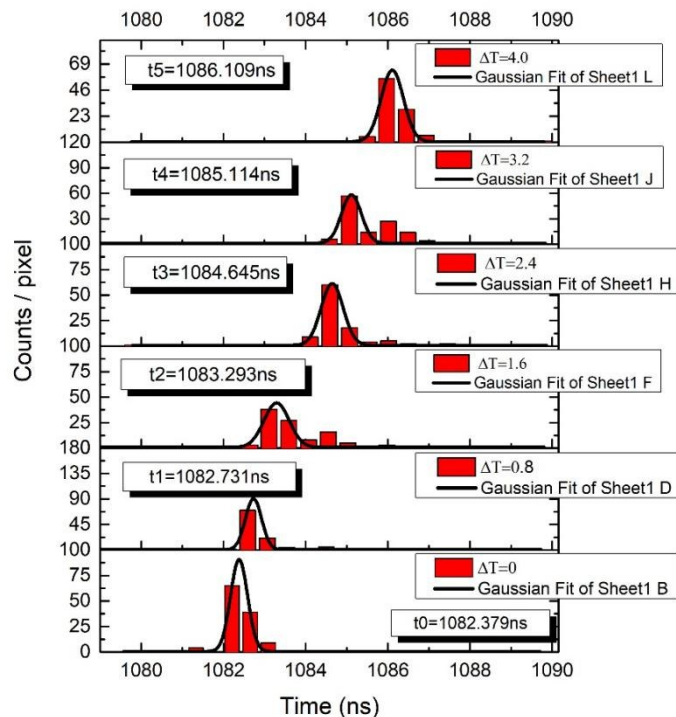


图 13 对到达时间  $0.8\text{ ns}$  递延的光波计时探测输出直方图

Fig. 13 Timing histogram measurements for light waves with a deferred arrival time of  $0.8\text{ ns}$



$\mu\text{m}$  延伸波长高光谱、像素级片上偏振集成和盖革模式雪崩焦平面等方向,突破了低缺陷 InGaAs 材料外延生长、高密度低暗电流焦平面芯片制备工艺、微纳结构及偏振光栅片上工艺集成、盖革雪崩器件和多模式多规格读出电路等关键技术,实现了  $10\ \mu\text{m}$  像素焦平面最大规模达  $2560\times 2048$  元,有效像元率达 99.7%,峰值探测率达  $1.1\times 10^{13}\ \text{cm}^2/\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ,同时报道了可见光波段量子效率、延伸波长器件暗电流、偏振消光比、单光子探测灵敏度等其他几类器件的性能参数。相关器件的进一步发展,将为新一代多功能、高分辨率、时间敏感的短波红外光电仪器研制提供探测器技术基础。

**致谢:**感谢于春蕾、王文娟、程吉凤、邓双燕等在芯片制备过程中的工作,感谢杨力怡、贺香荣、陈郁等在焦平面测试中的工作。感谢国家自然科学基金委(62175250)和上海市优秀学术带头人计划资助(21XD1404200)对研究经费的支持。感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所在材料外延生长方面长期合作,感谢复旦大学陈宜方团队在微纳加工方面的合作。

## References

- [1] Ettenberg M N, Michael J, Lange, *et al.* A Room Temperature  $640\times 512$  Pixel Near-Infrared InGaAs Focal Plane Array [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4028**:201-207.
- [2] Zhang W, Evans M, Huang W, *et al.* Mesa pixel isolation with low dark current for improved MTF performance in SWIR photodiode array applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, **11002**: 1100213.
- [3] Nazemi J, Brubaker R. Small SWaP TEC-less SWIR camera with current mirror pixel and temperature dependent non-uniformity corrections [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9819**: 981902.
- [4] Fraenkel R, Berkowicz E, Bikov L, *et al.* Development of low-SWaP and low-noise InGaAs detectors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10177**: 1017703.
- [5] Manda S, Matsumoto R, Saito S, *et al.* High-definition Visible-SWIR InGaAs Image Sensor using Cu-Cu Bonding of III-V to Silicon Wafer, 2019 [C]. IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 2019.
- [6] Song K, Lei J, Yuan H, *et al.* Development of A Hermetically Packaged  $13\ \mu\text{m}$  Pixel Pitch  $6000$ -Element InGaAs Linear Array [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10656**: 106560K.
- [7] Ettenberg M H, Nguyen H, Martin C R, Lange M. High resolution  $1.3$  megapixel extended wavelength InGaAs [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10624**: 1062404.
- [8] Duerr E K, Frechette J P, Mcintosh A, *et al.* Large-format image sensors based on custom Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10729**: 107290B.
- [9] Entwistle M, Itzler M A, Chen J, *et al.* Geiger-mode APD camera system for single-photon 3D LADAR imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8375**: 83750D.
- [10] Gu Y, Zhang Y G, Wang K, *et al.* Effects of growth temperature and buffer scheme on characteristics of InP-based metamorphic InGaAs photodetectors [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2013, **378**(1):65-68.
- [11] Xue L, Huang S, Yu C, *et al.* Noise characteristics of short wavelength infrared InGaAs linear focal plane arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112** (6) : 013202-1.
- [12] Yu C, Li X, Yang B, *et al.* Noise Characteristics Analysis of Short Wave Infrared InGaAs Focal Plane Arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**:74-80.
- [13] Liu Y G, Ma Y J, Li X, *et al.* Surface leakage behaviors of  $2.6\ \mu\text{m}$  In<sub>0.83</sub>Ga<sub>0.17</sub>As photodetectors as a function of mesa etching depth [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, **56**(2): 4000406.
- [14] Ma Y J, Deng S Y, Cheng J F, *et al.* Towards Surface Leakage Free High Fill-Factor Extended Wavelength InGaAs Focal-Plane Arrays [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, **55**(6): 4200208.
- [15] Wan L H, Shao X M, Ma Y J, *et al.* Dark current and  $1/f$  noise characteristics of In<sub>0.74</sub>Ga<sub>0.26</sub>As photodiode passivated by SiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilayer [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **109**: 103389.
- [16] Ma Y J, Li X, Shao X M, *et al.*  $320\times 256$  Extended Wavelength In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP Focal Plane Arrays: Dislocation Defect, Dark Signal and Noise [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, **28**(2): 3800411.
- [17] He W, Shao X M, Ma Y J, *et al.* Broadband high quantum efficiency InGaAs/InP focal plane arrays via accurate plasma thinning [J]. *Optics Letters*, 2019, **44** (24): 6037-6040.
- [18] He W, Shao X M, Ma Y J, *et al.* Ultra-low spectral reflectances of InP Mie resonators on an InGaAs/InP focal plane array [J]. *AIP advances*, 2020, **10**, 065233.
- [19] Yu Y Z, Ma Y J, Gu Y, *et al.* Mie-type surface texture-integrated visible and short-wave infrared InGaAs/InP focal plane arrays [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, **2**(8), 2558-2564.
- [20] Sun D, Li T, Yang B, *et al.* Research on polarization performance of InGaAs focal plane array integrated with superpixel-structured subwavelength grating [J]. *Optics express*, 2019, **27**(7):9447-9458.
- [21] Sun D, Feng B, Yang B, *et al.* Design and fabrication of an InGaAs focal plane array integrated with linear-array polarization grating [J]. *Optics Letters*, 2020, **45** (6) : 1559-1562.
- [22] Wichman A R, DeWames R E, Bellotti E. Three-dimensional numerical simulation of planar P+n heterojunction In<sub>0.55</sub>Ga<sub>0.47</sub>As photodiodes in dense arrays Part II: Modulation transfer function modeling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9070**:907004.
- [23] Zhang L A, Xu Y, Song G F, Investigation of modulation transfer function in InGaAs photodetector small pitch array based on three-dimensional numerical analysis [J].

- 
- Optical and Quantum Electronics*, 2020, **52**(3): 171.
- [24] Li X, Tang H J, Li T, *et al.* Crosstalk study of near infrared InGaAs detectors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9819**: 98192A.
- [25] Baker G, Wilson M, Coulter P. Development and results of NIR polarization camera [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6567**: 65671L.
- [26] Hu X Y, Wang X, Ding Z Y, *et al.* Research Progress in Integrated Polarization Infrared Detector and Image Processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10697**: 106974I.