

高性能 512×2 元线列 InGaAs 短波红外探测器

朱 琴, 范明国, 宋欣波, 齐浩泽, 方莉媛, 管 涛, 龚晓霞

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对色选行业对高均匀性、低暗电流、低盲元率的线列 InGaAs 短波红外探测器的迫切需求, 本文基于 MOCVD 生长的 n-i-n 型 InP/InGaAs/InP 外延材料, 采用扩散、钝化膜制备、电极生长等工艺, 制备了 512×2 元线列 InGaAs 短波红外探测器。通过优化器件结构及钝化膜制备工艺, 器件暗电流得到了有效的抑制; 通过对倒装互联工艺参数进行优化, 实现了高可靠性、高连通率的 512×2 元线列探测器的制备。室温下 (25℃) 对探测器组件进行测试, 其峰值探测率为 $1.13 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, 暗电流密度为 12.8 nA/cm^2 , 有效像元率 $\geq 99.5\%$, 响应非均匀性低至 0.63%。

关键词: InGaAs; 钝化; 暗电流; 倒装互联

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2024)07-0826-05

High-Performance 512×2-Element Linear InGaAs Short-Wavelength Infrared Focal Plane Detector

ZHU Qin, FAN Mingguo, SONG Xinbo, QI Haoze, FANG Liyuan, GUAN Tao, GONG Xiaoxia

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: To meet with the ongoing demand for high uniformity, low dark current and low-blind pixels of linear InGaAs short-wavelength-infrared focal plane detector in color separation industry, based on MOCVD-grown n-i-n type InP/InGaAs/InP epitaxial materials, a 512×2-element linear InGaAs short-wavelength-infrared focal plane detector was fabricated using diffusion techniques, preparation of the passivation layer, and growth of the electrode. The dark current of this detector was effectively suppressed by optimizing the structure of the detector and the passivation layer technique. Moreover, high reliability and low-blind pixels were achieved by optimizing the parameters of flip-chip interconnection. The detector assembly was tested. The measurement results show a peak detectivity of $1.13 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, dark current density of 12.8 nA/cm^2 , effective pixel rate higher than 99.5%, and response non-uniformity as low as 0.63% at room temperature (25℃).

Key words: InGaAs, passivation, dark current, flip chip interconnection

0 引言

短波红外波段覆盖 1~3 μm 红外辐射范围, 探测器工作在该波段能获得目标更多的辐射能量。另外, 短波红外探测器对近室温目标的探测成像类似于可见光的反射成像, 一方面拥有中长波红外探测器缺少的细节分辨能力, 另一方面具有穿透烟雾进行成像等可见光探测不具备的能力。目前用于制备短波红外探测器的材料主要有 HgCdTe、PtSi、InGaAs、量子点薄膜等, 其中 InGaAs 器件因其具有高探测率、高均匀性、可室温操作、体积小、工艺成熟等优点, 是发展小型化、低功耗和低成本的短波红外探测器的最佳选择。

随着 InGaAs 短波红外探测器技术持续发展, 目前短波红外技术已广泛应用于航天遥感、夜视/融合成像、侦查监视、目标识别及跟踪、激光雷达、制导及导弹预警等军事领域; 在民用领域主要用于半导体/硅片检测、农产品筛选、高温目标检测、激光光斑质量检验、医学成像、光谱分析、驾驶辅助、森林防火、边防监控、水面搜救、天文观测、光电通信及过程控制^[1-3]等。

近年来, 因 InGaAs 短波红外探测器有效解决了很多可见光谱段无法区分的一些物质, 如水分、蛋白质、糖分、胡萝卜素, 塑料成分等, 因此, 其在色选行业具有广阔的应用前景和价值。目前, 国内 InGaAs

收稿日期: 2023-10-12; 修订日期: 2023-12-25.

作者简介: 朱琴 (1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事铟镓砷短波红外探测器研究, E-mail: 820594162@qq.com。

通信作者: 龚晓霞 (1984-), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事 III-V 族红外探测器研究, E-mail: 641592956@qq.com。

短波红外探测器产品的工艺水平和综合性能均得到了较大的提升, 但针对色选行业用的长线条 InGaAs 短波红外探测器产品仍存在暗电流较大、响应均匀性差, 盲元较多等问题, 严重限制了 InGaAs 短波红外探测器在色选领域的快速推广应用, 因此迫切需要开展针对色选行业应用的长线条 InGaAs 短波红外探测器优化工作。

本文基于金属有机化合物化学气相沉淀 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 生长的 n-i-n 型 InP/InGaAs/InP 外延材料, 通过优化器件结构及钝化膜制备工艺, 达到抑制光敏芯片暗电流的目的。此外, 通过对倒装互联工艺参数进行优化, 解决了长线条探测器芯片因翘曲引起互联失效导致的大量盲元问题, 最终实现高性能的 512×2 元线列 InGaAs 短波红外探测器的制备, 为促进 InGaAs 短波红外探测器在色选领域的快速推广应用奠定了基础。

1 器件结构设计与器件制备

InGaAs 短波红外探测器根据成结方式不同, 可以分为平面型和台面型, 如图 1 所示。对于台面型器件, 在材料生长完成后, 对整片外延材料进行 p 型掺杂, 通过刻蚀进行物理隔离以形成相互独立的光敏元。相较于台面型器件, 平面型器件的 p-n 结埋藏于外延材料之中, 避免了侧壁暴露导致的侧面漏电, 器件的暗电流更低, 可靠性更高。因此, 本文选用平面型结构完成器件制备。

本文基于 MOCVD 生长的 n-i-n 型 InP/InGaAs/InP 外延材料进行器件制备, 材料结构为: 帽层 InP 厚度为 0.5 μm, 吸收层 InGaAs 厚度为 2.5 μm, n-InP 厚度为 0.3 μm。外延片经过表面清洗及处理后, 进行平面型 InGaAs 线列探测器的制备, 主要流程包括: 采用感应耦合等离子体化学气相沉积 (Inductively

Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition, ICPCVD) 设备沉积 SiO₂ 扩散掩膜, 通过干法刻蚀进行扩散孔开孔, 采用 MOCVD 对光敏元进行 Zn 扩散成结, 器件表面钝化采用 ICPCVD 沉积薄膜, 在制备完电极后完成芯片分割, 并采用倒装互联完成芯片与读出电路的耦合, 最后采用金属管壳进行封装, 封装完成后采用焦平面测试系统完成探测器性能测试及评价。

2 结果与讨论

2.1 表面钝化研究

焦平面探测器的暗电流分为体内漏电流和表面漏电流, 针对 InGaAs 探测器的表面漏电流与体内漏电流的分布研究表明, 表面漏电流是器件暗电流的重要组成部分, 表面漏电会极大地降低器件性能, 其主要表现为器件在高温、长积分时间条件下使用时, 其暗电流噪声会极大影响成像效果, 导致检测效果变差。当器件尺寸变小时, 表面漏电流对探测器性能影响增大^[4-5], 平面型 InGaAs 探测器的 pn 结主要埋藏于材料内, 表面漏电主要来源于表面钝化 (如图 2 所示), 所以采用合适的钝化方法以抑制表面暗电流, 对提升器件性能尤为重要。

目前用于 InGaAs 探测器表面钝化的介质膜主要有 SiN_x、SiO₂、Al₂O₃ 及有机聚合物等^[6-7]。本文采用感应耦合等离子体化学气相沉积设备完成 InGaAs 探测器 SiO₂、SiN_x 钝化膜生长, 通过对器件电流-电压 (*I-V*) 特性曲线进行分析, 对钝化工艺对比研究。测试结果表明 (如图 3 与图 4 所示), 采用 SiN_x 膜系制备的 InGaAs 器件的 *I-V* 特性较差, 其随着反向偏压的加大漏电增加, 而与 SiN_x 膜系相比, 采用 SiO₂ 膜系制备的 InGaAs 器件 *I-V* 特性更好, 其反向漏电随偏压的变化仍保持良好的平坦区, 说明在测试电压范围内, 该膜系的钝化层未出现漏电现象。

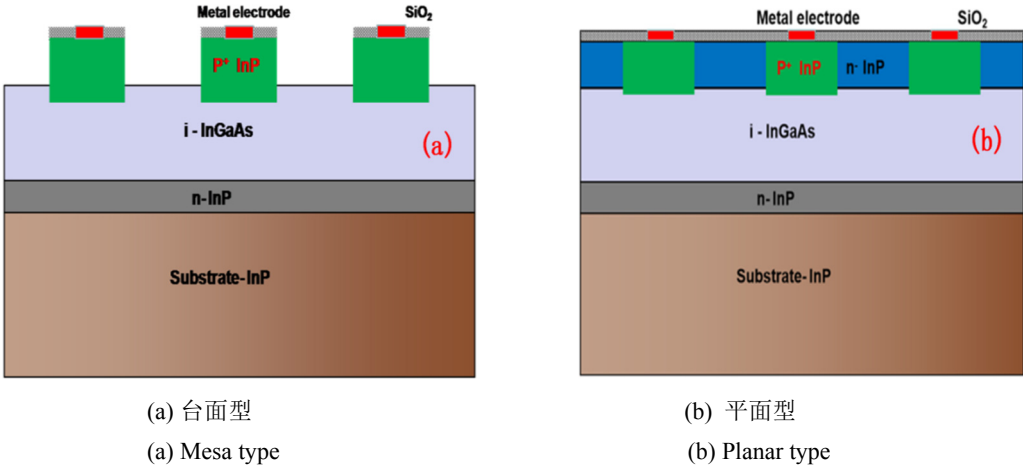


图 1 InGaAs 探测器结构示意图
Fig.1 The schematic diagram of InGaAs detector

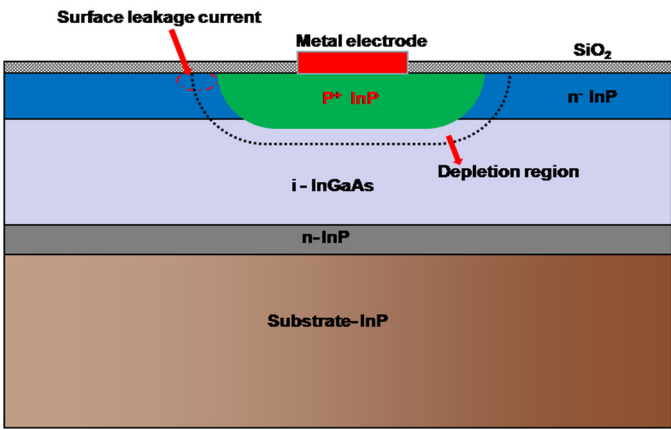


图2 平面型 InGaAs 探测器表面漏电示意图

Fig.2 The surface leakage current diagram of planar InGaAs detector

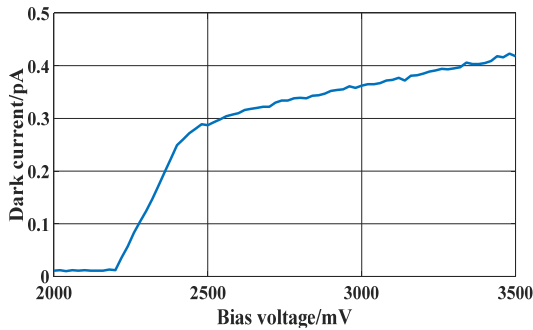


图3 SiNx钝化 InGaAs 探测器典型 I - V 曲线

Fig.3 Typical I - V curve of detector with SiNx passivation

为进一步研究 SiO₂ 与 SiNx 膜系的 I - V 特性差异, 针对两种膜系开展了不同厚度的应力测试分析研究, 如图 5 所示。可以看出, 随着厚度的增加, 两种膜系的应力绝对值都在增大, 且 SiNx 的应力明显高于 SiO₂。结合上述的 I - V 曲线对比结果说明, 钝化膜的应力大小显著影响了 InGaAs 芯片的 I - V 特性, 这是因为当不同膜系钝化膜沉积在 InGaAs 芯片表面时, 会在 P-N 结上产生应力, 导致 P-N 的空间电荷区发生弯曲, 当施加反向偏压时, 会有一部分电流从 P-N 结的形变区流过, 产生漏电, 且随着应力的增大, P-N 的空间电荷区弯曲程度更大, 产生的漏电也随之增大, 导致器件 I - V 特性变差。

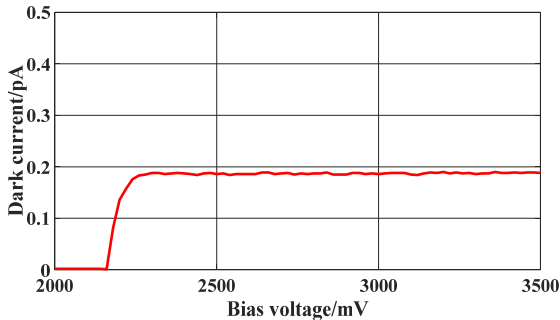


图4 SiO₂钝化 InGaAs 探测器典型 I - V 曲线

Fig.4 Typical I - V curve of detector with SiO₂ passivation

针对 SiO₂ 膜系, 开展了不同反应气体配比、压强、功率、厚度及温度等一系列的优化研究, 最终有效抑制了器件表面漏电, 降低了小像元 InGaAs 线列探测器暗电流。如图 6 所示, 在室温及 -0.5 V 偏压下对器件进行测试, 图 6(a)为 512×2 元线列探测器各像元暗电流大小, 图 6(b)为 512×2 元线列探测器暗电流统计分布图, 从图中可以得到, 像元中心距为 25 μm 的 512×2 背照射平面型 InGaAs 线列探测器暗电流均值为 80 fA, 经计算, 其暗电流密度为 12.8 nA/cm²。

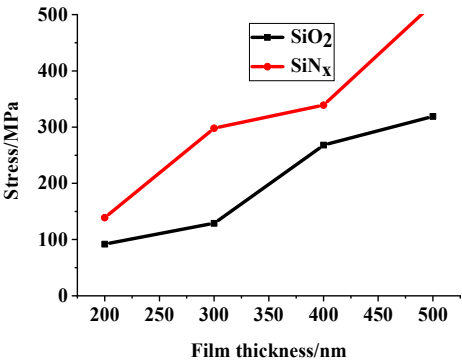


图5 不同膜系不同厚度的应力曲线

Fig.5 Stress curve with different films and thicknesses

2.2 倒焊互连研究

InGaAs 线列探测器中光敏芯片与读出电路的互连一般采用直接倒焊互连或传统的引线键合, 直接倒焊互连方式的核心内容是用凸点互连来代替传统的引线互连, 实现高密度、高效率的电学连接^[8]。与传统引线键合方式相比, 直接倒焊具有电极密度高、对位精度高、整体体积小、传输速率快、互连寄生参数小等优点, 而传统引线键合由于引线一般分布在光敏芯片四周边缘, 其引线密度较低, 限制了器件向空间纵向的扩展。因此, 本文采用直接倒焊互连的方式实现 512×2 元 InGaAs 探测器阵列与读出电路相互连。

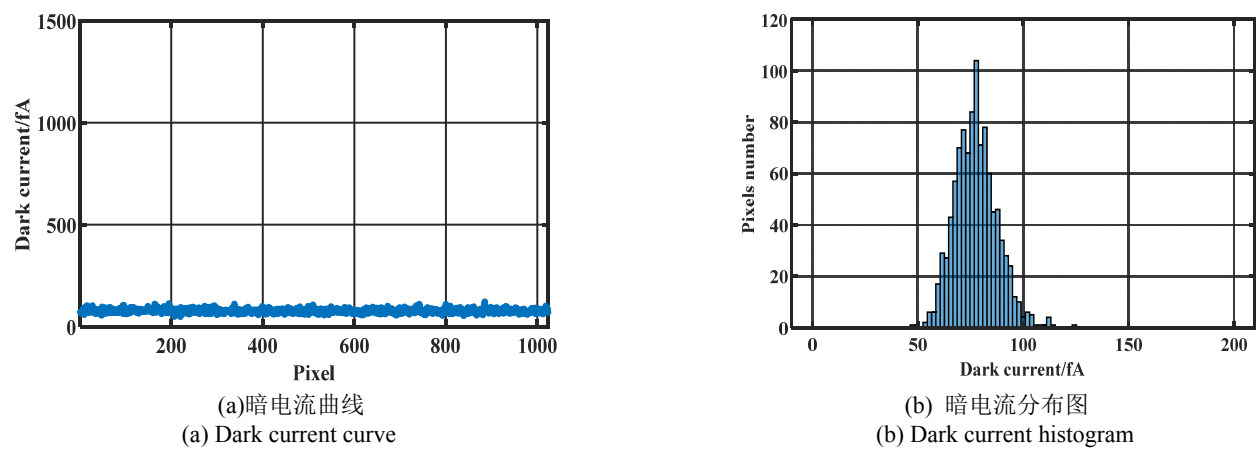


图 6 512×2 元 InGaAs
Fig.6 512×2 element linear InGaAs detector

本文中制备的 512×2 元 InGaAs 探测器芯片，芯片长宽比约为 4:1，材料厚度约为 350 μm，为基底较薄的长条形芯片，加之工艺过程中不可避免地涉及到温度和压力的作用，最终造成芯片翘曲较大。通过采用激光干涉仪对 512×2 元线列 InGaAs 探测器芯片翘曲进行测试，如图 7 所示，可以看出，芯片翘曲主要分为中间翘曲及单边翘曲两种。芯片的翘曲会严重影响 InGaAs 线列探测器的倒焊连通率，这是因为：芯片翘曲加大了倒焊对钢柱高度的依赖性，由于芯片翘曲严重，倒焊互联过程钢柱与芯片接触时，各点所受压力不一致，先接触部分压力较大，钢柱变形严重，引起短路或者 PN 结损伤，成为过热像元；而另一部分由于压力过小，钢柱甚至无法与芯片电极发生接触，导致一部分钢柱与芯片电极未能形成真正有效的电连接，成为死像元或不稳定像元。而上述两种情况通常都是共同作用于一个器件，造成大量盲元的产生，严重影响倒装互连效果。因此，对于长线列 InGaAs 探测器来说，由于芯片翘曲的存在，对倒焊互连过程中的焊接温度、压力等条件提出更高的要求。

针对上述存在的问题，本文为提高倒焊互连效果，通过多组实验对焊接温度和焊接压力进行优化，确定最佳的焊接温度由优化前的 30℃ 提高至 100℃，最佳的焊接压力由优化前的 4.8 kg 降至 3.6 kg，有效提高了倒焊连通率和焊接的可靠性，优化后器件像元连通率大于 99.5%（如图 8 所示），与国内已报道的 InGaAs 线列探测器相比^[9]，处于领先水平，实现了高性能高可靠性 InGaAs 线列探测器的制备。

2.3 性能测试

基于自主开发的测试平台，对所制备的 25 μm 中心距 512×2 元 InGaAs 线列焦平面探测器组件进行了光电性能测试，测试时通过测试电路板为探测器组件提供所需的偏置电压和驱动时序，然后通过采集卡将数据采集到测试上位机软件并进行计算，最终得到测试结果。图 9 和图 10 分别为 512×2 元 InGaAs 线列探测器响应直方图和噪声直方图，可以得到，其平均响应信号为 1.132 V，平均噪声电压为 0.68 mV，根据测得的结果计算得到焦平面的峰值探测率为 $1.13 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ ，响应非均匀性为 0.63%，与国内已报道的 InGaAs 线列探测器相比，处于领先水平。

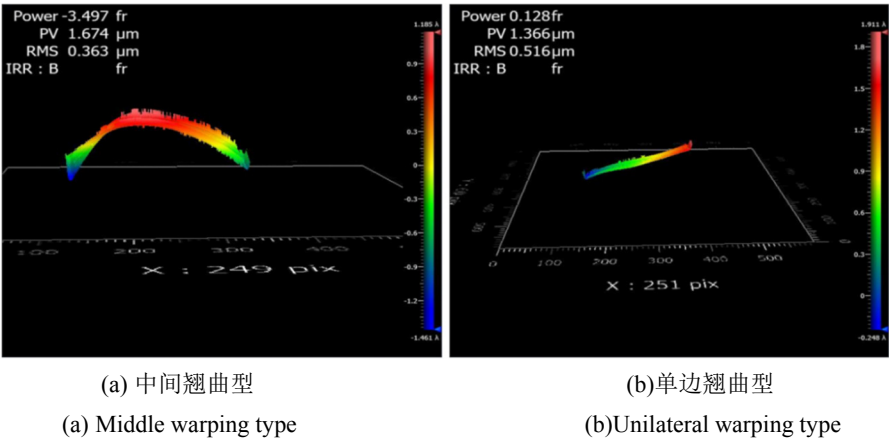


图 7 512×2 元 InGaAs 线列探测器芯片翘曲图

Fig.7 The warpage of 512×2 element linear InGaAs detector chip

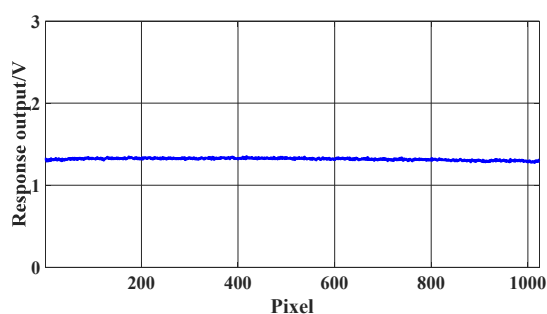


图8 512×2元 InGaAs 线列探测器响应曲线

Fig.8 Response curve of 512×2 element linear InGaAs detector

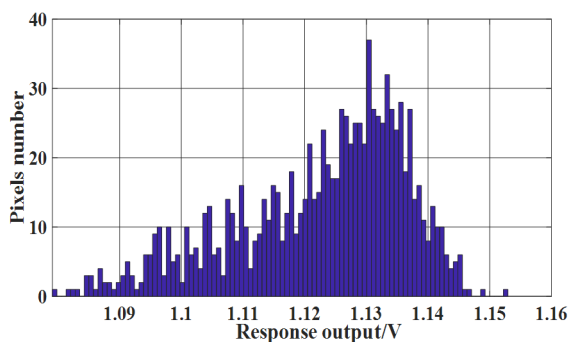


图9 512×2元 InGaAs 线列探测器响应直方图

Fig.9 Response histogram of 512×2 element linear InGaAs detector

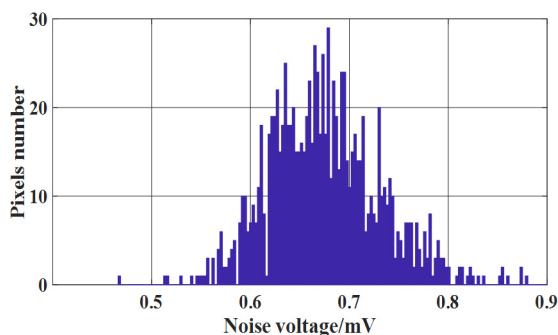


图10 512×2元 InGaAs 线列探测器噪声直方图

Fig.10 Noise histogram of 512×2 element linear InGaAs detector

3 结论

本文通过对器件结构、钝化膜制备工艺及倒焊工艺进行优化,实现了高性能 512×2/25 μm 背照射平面型 InGaAs 线列探测器的制备,室温下其峰值探测率为 $1.13 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$,暗电流密度为 12.8 nA/cm^2 ,有效像元率 $\geq 99.5\%$,响应非均匀性低至 0.63%。

为满足 InGaAs 线列焦平面探测器的应用及发展要求,后续将进一步降低暗电流、提高探测率、降低响应非均匀性,同时向更长线列发展。

参考文献:

- [1] ZHANG Yonggang, GU Yi, SHAO Xiumei, et al. Short-wave infrared InGaAs photodetectors and focal plane arrays[J]. *China Phys. B*, 2018, **12**: 57-63.
- [2] 岳桢干. 比利时 Xenics 公司研制 Proba-V 卫星载 InGaAs 短波红外探测器[J]. *红外*, 2013, **34**(7): 19.
YUE Zhenggan. Proba-V Satellite-borne short-wave infrared InGaAs focal plane detector developed by Xenics company in Belgium[J]. *Infrared*, 2013, **34**(7): 19.
- [3] Hoffman A, Sessler T, Rosbeck J, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications[C]//*Proceedings of SPIE*, 2005, **5783**: 32-38.
- [4] 于春蕾, 龚海梅, 李雪, 等. 2560×2048 元短波红外 InGaAs 焦平面探测器[J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(3): 1-10.
YU Chunlei, GONG Haimei, LI Xue, et al. 2560×2048 short-wave infrared InGaAs focal plane detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(3): 1-10.
- [5] 曹高奇. 高灵敏度平面型 InGaAs 短波红外探测器应用基础研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
CAO Gaoqi. Study on High Sensitivity Planar InGaAs Short Wavelength Infrared Detector[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [6] 李雪, 邵秀梅, 李涛, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(1): 1-8.
LI Xue, SHAO Xiumei, LI Tao, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(1): 1-8.
- [7] Olsen G H, Joshi A M, Ban V S, et al. Multiplexed 256 element InGaAs detector arrays for 0.8~1.7 μm room temperature operation[C]//*Proc. of SPIE*, 1988, **972**: 279-285.
- [8] 董绪丰. 混成式焦平面探测器倒装互连研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
DONG Xufeng. The Research of Flip-Chip Bonding Technology about Hybridfocal Plane Array Detector[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [9] 龚海梅, 张可锋, 唐恒敬, 等. InGaAs 近红外线列焦面阵的研制进展[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 5-18.
GONG Haimei, ZHANG Kefeng, TANG Hengjing, et al. Developments of near IR linear InGaAs FPAs in China[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 5-18.