

文章编号: 1672-8785(2021)02-0008-07

高德红外 640×512 中波红外 探测器的规模化生产

刘文波 刘 斌 凡陈玲 余志杰 张丽芳 程海玲 杨 益
孙 超 李云鹏 张传杰 王立保 周文洪 黄 立*
(武汉高德红外股份有限公司, 湖北武汉 430000)

摘 要: 经过多年的研发工作, 制冷型碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)中波红外探测器已经实现了批量化生产能力, 其阵列规格也从最初的 320×256 发展到现在的 1280×1024(百万像元级)。目前, 随着武汉高德红外股份有限公司(以下简称“高德红外公司”)探测器产品水平的不断提高, 基于红外探测器的热成像系统被广泛应用于机载、舰载、陆战以及手持观测等军用装备。以 640×512/15 μm 碲镉汞中波红外探测器为例, 介绍了高德红外公司探测器产品的工程化应用情况, 并分析了探测器研制过程中需要解决的问题, 最后指出了未来探测器发展及应用的方向。

关键词: 红外探测器; 碲镉汞; 工程化问题

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.02.002

Large-Scale Production of 640×512 Middle-Wavelength Infrared Detectors from Guide Infrared Company Limited

LIU Wen-bo, LIU Bin, FAN Chen-ling, YU Zhi-jie, ZHANG Li-fang, CHENG Hai-ling,
YANG Yi, SUN Chao, LI Yun-peng, ZHANG Chuan-jie,
WANG Li-bao, ZHOU Wen-hong, HUANG Li*
(Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: After years of research and development, the cooled mercury cadmium telluride (MCT) middle-wavelength infrared (MWIR) detectors have achieved mass production capacity, and the array specifications have also developed from the initial 320×256 to the current 1280×1024 megapixel level. At present, as the detector product level of Wuhan Guide Infrared Co., Ltd. (hereinafter referred to as "Guide Infrared company") is continuously improving, thermal imaging systems based on infrared detectors are widely used in airborne, shipborne, land combat, handheld observation and other military equipments. Taking the 640×512/15 μm MCT MWIR detector as an example, the engineering application of Guide Infrared company's detector products is introduced, and the problems that need to be solved during the development of the detectors are analyzed. Finally, the future development and application direction of the detectors is pointed out.

收稿日期: 2020-09-17

作者简介: 刘文波(1988-), 男, 山东济南人, 硕士, 主要从事制冷型红外探测器芯片技术研究。

***通讯作者:** E-mail: guidehl@163.com

Key words: infrared detector; HgCdTe; engineering problem

0 引言

高性能中波红外探测器一直是红外技术应用领域的研究热点。碲镉汞是目前高性能红外探测器制作中最重要的半导体材料^[1-2], 其器件具有量子效率高、响应速度快、功耗小以及便于大规模集成等优点。如今, 欧美的红外探测器厂商采用碲镉汞作为敏感材料而研制的中波红外探测器已达到百万像元规模。其中, 美国雷神视觉系统(RVS)公司已推出了面阵规模为 $4k \times 4k$ 的千万像元红外探测器。与百万像元探测器相比, 该产品在成像质量和探测距离等性能上均有显著提升。

高德红外公司的探测器中心成立于 2013 年, 具备完善的红外探测器制造设备及批量化生产线, 并拥有一个由涵盖碲镉汞材料生长、芯片制备、读出电路设计、微杜瓦封装、低温制冷机制造以及组件测试等领域的研发、工艺与生产人员(超过 500 人)构成的制冷红外探测器团队。

1 碲镉汞器件生产中遇到的问题

1.1 碲镉汞红外探测器的工艺特点

碲镉汞红外探测器是探测器芯片经过组件化封装, 并搭载微型制冷机而形成的器件。根据 pn 结极性的不同, 国内外的碲镉汞红外探测器芯片一般分为 n-on-p 和 p-on-n 两种。两种 pn 结的成结工艺一般均用离子注入来实现。图 1 所示为碲镉汞红外探测器的工艺路线。

如图 1 所示, 碲镉汞红外探测器的制备工艺可分为衬底加工、外延加工、探测器芯片加工、杜瓦零部件加工、杜瓦组件制备和探测器耦合等六部分。

1.2 工艺技术优化

高德红外公司自主研制的 $640 \times 512 / 15 \mu\text{m}$ 碲镉汞中波红外探测器是典型的第二代红外焦平面探测器。通过对标法国的同规格探测器可以看出, 两者的外观和接口保持一致, 前者的主要光电性能达到或优于后者水平。由于像元

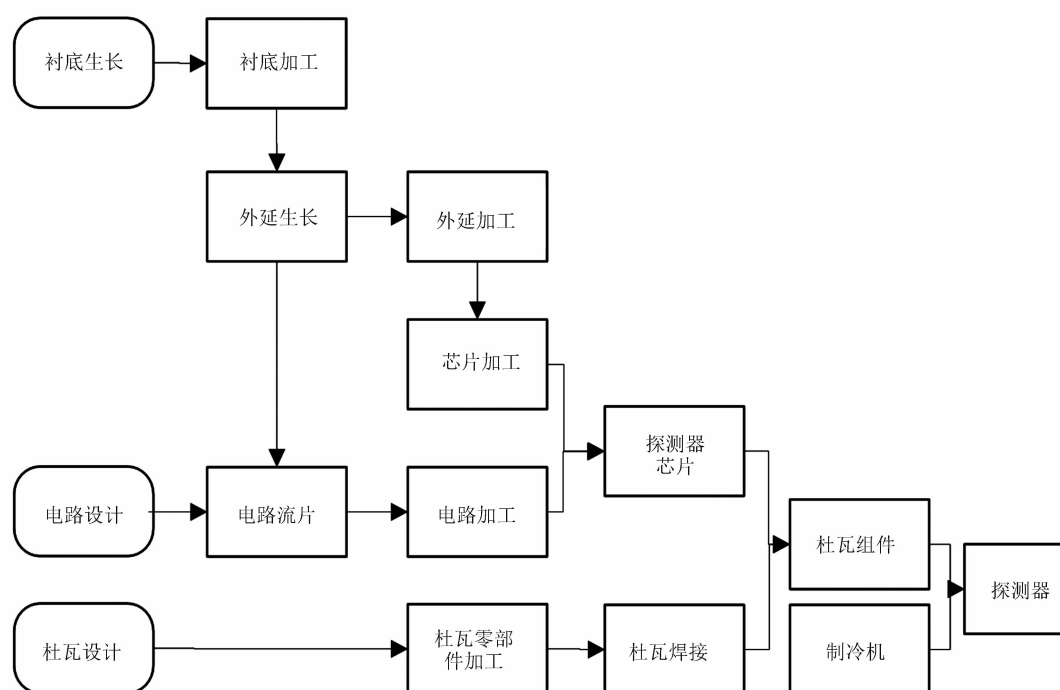


图 1 碲镉汞红外探测器的工艺路线

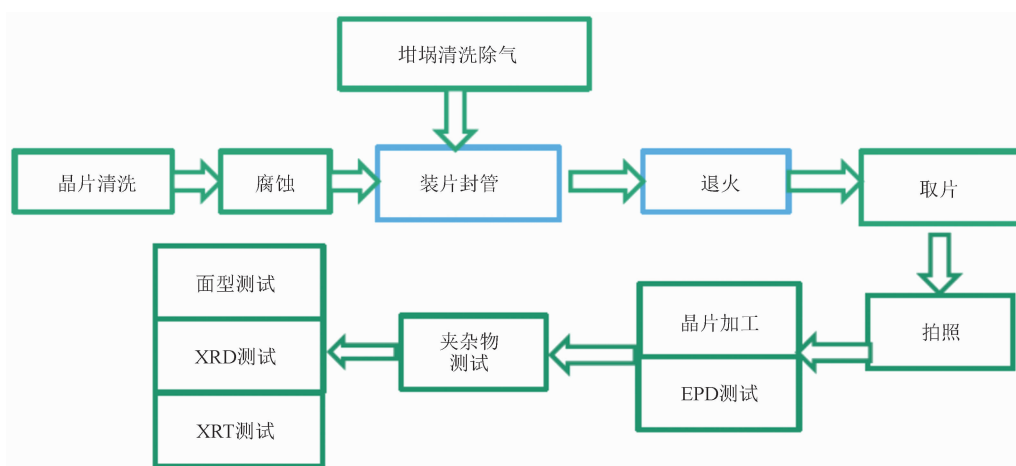


图2 退火工艺流程

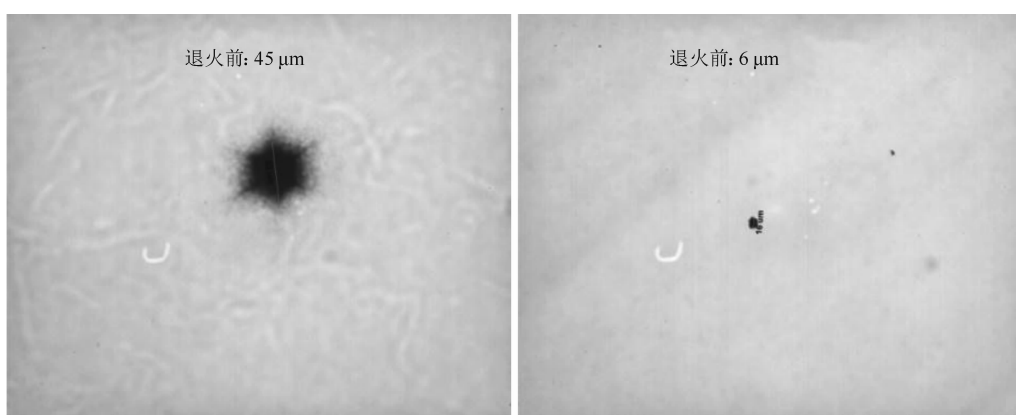


图3 衬底退火前后对比

尺寸、阵列规格等方面的要求比 $320 \times 256 / 30 \mu\text{m}$ 探测器更高, $640 \times 512 / 15 \mu\text{m}$ 碲镉汞中波红外探测器在制备过程中需要得到以下几项优化。

1.2.1 减小材料缺陷尺寸, 提高材料质量

像元尺寸缩小对材料表面质量提出了更高的要求。为控制探测器成像时的盲元尺寸, 必须尽量减小材料缺陷尺寸。相关试验证明, 在富碲气氛下对衬底晶片进行退火热处理, 可有效减小夹杂物缺陷尺寸。图2所示为退火工艺流程。图3所示为某片衬底退火前后夹杂物尺寸的红外显微镜对比效果。可以看出, 退火后的衬底夹杂物尺寸由原先的 $45 \mu\text{m}$ 降到 $10 \mu\text{m}$ 以下。理论上, 盲元尺寸由 3×3 的团簇降至单个点簇。图4所示为批量衬底退火前后的夹杂物尺寸变化情况。退火后, 70%衬底夹杂物的尺寸可保证在 $10 \mu\text{m}$ 以下。此时在衬底材料

上进行碲镉汞外延生长, 所得外延材料的表面缺陷密度明显降低, 一般可控制在 10^5 cm^{-2} 以下。经焦平面芯片流片验证, 芯片团簇比例明显下降。

1.2.2 高精度互连

红外敏感芯片与读出电路之间通过倒装互连的方式连接在一起, 其中凸点材料选择铜。该材料电导率较高、易变形, 且在低温下能保持良好的延展性, 因此是红外探测器芯片互连的理想材料。为保证小尺寸像元互连的成功率, 需要对材料平整度、铜柱均匀性以及倒装焊接互连等方面进行优化。

1.2.2.1 材料平整度

通过优化衬底磨抛工艺, 碲镉汞衬底的平整度明显降低。对于 $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 规格的碲镉汞晶片, 平整度可做到小于 $1 \mu\text{m}$, 且表面粗糙度仅为 $1 \sim 2 \text{ nm}$ (见图5)。

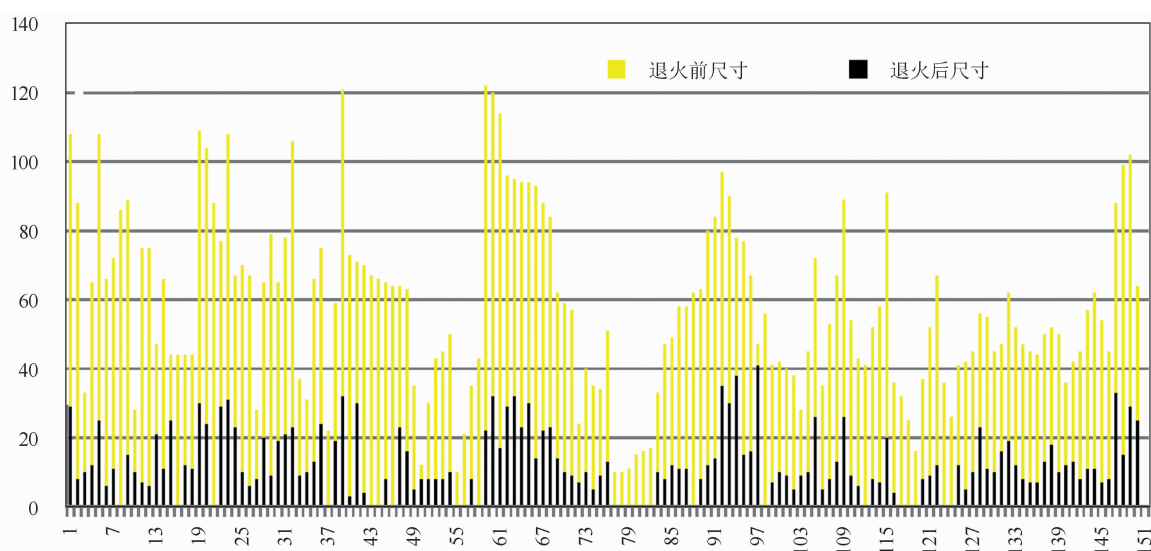


图 4 批量衬底退火前后的夹杂物变化情况

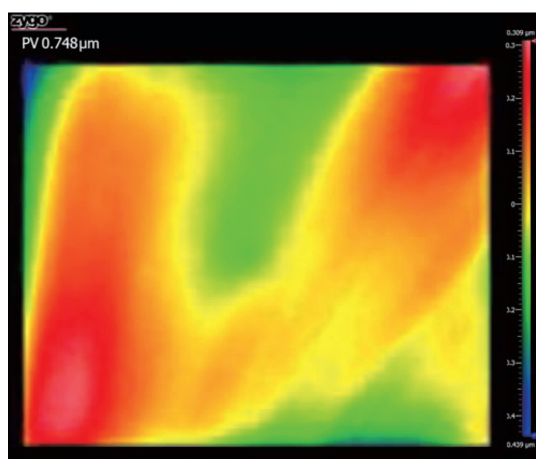


图 5 碲镉汞衬底的平整度

1.2.2.2 钢柱均匀性

通过优化光刻-镀膜工艺, 得到高均匀性钢柱凸点。首先, 通过调研和验证来确定分辨率及均匀性均满足要求的光刻胶; 其次, 在优化工艺的基础上, 利用高精度匀胶、曝光及显影设备制备出了满足要求的光刻图形; 另外, 通过采用高真空蒸镀系统并对衬板清洁等工艺进行改进, 得到了高均匀性钢膜; 最终通过剥离实现了钢柱阵列。优化后的钢柱形貌均匀性达到 $\pm 1 \mu\text{m}$, 满足倒装互连要求。

1.2.2.3 倒装焊接互连

倒装焊接互连时, 采用高准直的激光找平技术将互连面的平行度调整至 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内, 保障互连凸点所受压力及产生的形变一致。通

过高清双向显微镜和高分辨率电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 对互连面上的凸点进行对位, 并利用四边的对准游标进行校准。在双重对位系统的保障下, 对位精度可达 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 。此精度下的倒焊互连成功率可稳定在 99.9% 以上。图 6 所示为 2019 年高德红外公司自研 $640 \times 512 / 15 \mu\text{m}$ 碲镉汞中波红外探测器的盲元数据。可以看出, 目前的有效像元率可稳定在 99.9% 左右。

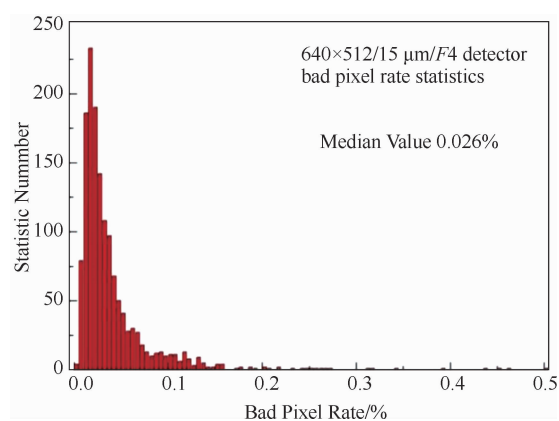


图 6 探测器盲元分布

1.2.3 长真空寿命杜瓦封装

为保证探测器杜瓦组件的长真空寿命, 不仅需控制杜瓦漏率及内部放气, 而且还要在腔室内放置吸气剂。根据法国 Lynred 公司的杜瓦寿命测试方法^[3], 采用老化试验进行测试评估。20℃时, 杜瓦的贮存寿命可达 20 年。图 7

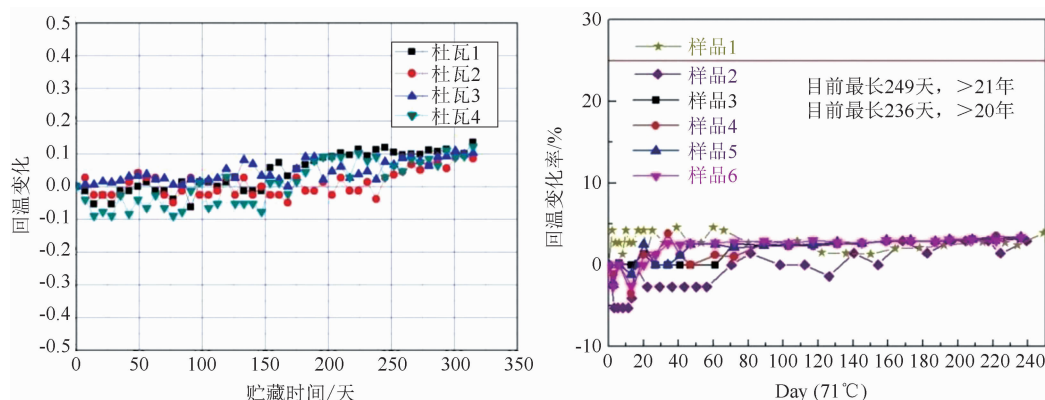


图 7 红外探测器的常温贮存寿命

表 1 探测器组件的机械应力试验条件及结果

试验项目	试验条件	上电测试结果	判断
15g 随机 振动(加强试验)		峰值电流和控温电流的变化量均小于 5%；降温时间的变化量小于 10 s；芯片性能合格	合格
19g 随机 振动(加强试验)		峰值电流和控温电流的变化量均小于 5%；降温时间的变化量小于 10 s；芯片性能合格	合格

所示为高德红外公司生产的两种 640×512/15 μm 规格红外探测器的贮存结果。

1.2.4 组件可靠性的提升

在开机-工作-关机过程中，探测器芯片会经历常温-低温-常温的温度变化。由于芯片自身属于多膜系结构，膜系间会产生较大的应力作用，芯片由此也容易产生互连失效及断裂风险。另外，随着应用范围的扩大，外界环境对探测器的适应性要求也越来越高。比如，机载环境会对探测器的耐振动可靠性有更为严苛的要求。通过优化芯片及杜瓦结构并对冷头进行加固设计，可以明显提升探测器芯片及冷端的可靠性。

在对芯片进行 2000 次液氮冲击和 1500 次

开关机制冷试验后，其盲元数及分布状况没有发生明显变化。经过大量级振动后，探测器性能正常。表 1 列出了探测器在超过常规量级的振动试验后的测试结果。

针对影响探测器组件长期运行可靠性的失效模式，制定了可靠性保障及验证方案。经过充分的试验验证后，探测器的可靠性得到了显著提升。图 8 所示为制冷机跑机过程中的电流曲线。

2 典型产品

图 9 所示为高德红外公司目前研制的三种 640×512/15 μm 碲镉汞中波红外探测器。其中，前两种分别是 Lynred 公司的 SCORPIO MW K508 和 LEO MW RM2 探测器的对标产

品; 第三种为自研的轻便型探测器, 搭载旋转分置式斯特林制冷机后, 可明显减小整机系统的体积。三者的主要性能指标如下: (1) 光谱范围为 $3.7 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m} \sim 4.8 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ 。(2) 工作模式: snap shot; IWR/ITR; 支持开窗功能。(3) 动态范围 $\geq 75 \text{ dB}$ 。(4) 输出通道有 4 个, 单通道最大输出速率 $\geq 10 \text{ MHz}$ 。(5) 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD): $\leq 18 \text{ mK}(F2)$; $\leq 22 \text{ mK}(F4)$; $\leq 25 \text{ mK}(F5.5)$ 。(6) 有效像元率 $\geq 99.6\%$ 。(7) 环境适应性详见表 2。

3 具体应用

$640 \times 512/15 \mu\text{m}$ 探测器与 $320 \times 256/30 \mu\text{m}$ 探测器在红外芯片尺寸上基本相同, 因此两种探测器的外观及尺寸可保持一致。这就为原先采用 $320 \times 256/30 \mu\text{m}$ 探测器的红外整机等光电系统的更新迭代提供了便利, 即可在不

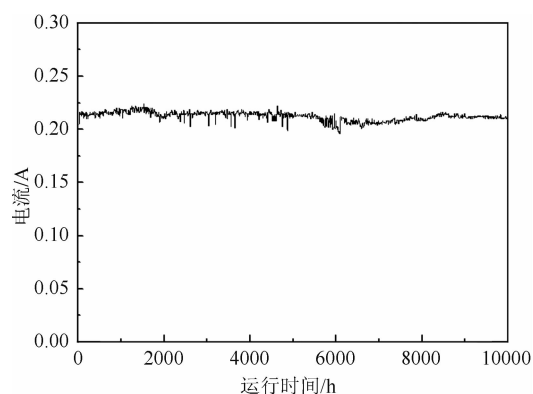


图 8 样机试验过程中的电流曲线

改变整体结构尺寸及框架设计的基础上实现无缝替换, 从而完成相关装备的性能升级。

如表 3 所示, $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ 探测器可广泛应用于机载、舰载、陆军车载、手持等红外整机中。

4 结论

碲镉汞探测器的规模化生产和批量应用会



图 9 高德红外 $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ 碲镉汞中波红外探测器

表 2 探测器的环境适应性

制冷机类型	旋转整体式	旋转整体式	旋转分置式
稳定功耗(20℃)	<7 W	<6.5 W	<6.5 W
最大功耗(20℃)	<13 W	<12 W	<12 W
焦平面工作温度	<100 K	<100 K	<100 K
电源供应	24VDC	32VDC	32VDC
制冷时间	<6.5 min	<5.5 min	<6.5 min
重量	<600 g	<350 g(不含电控)	<350 g
工作温度	-45℃ ~ +71℃	-45℃ ~ +71℃	-45℃ ~ +71℃

表 3 红外探测器的应用领域

序号	应用领域
1	无损检测
2	吊舱、转塔
3	光谱分析
4	远距离监控系统
5	手持式侦察系统
6	搜索与跟踪系统
7	飞机视觉增强系统

随工艺的不断优化而加以实现。高德红外公司在 $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ 探测器的研制过程中解决了一系列工艺难题。首先,通过减小材料表面缺陷尺寸和提高倒装焊接精度,使探测器芯片的盲元数量及团簇规模明显减小;其次,通过优化封装工艺,使杜瓦的真空寿命延长至 20 年;最后,通过提升组件可靠性,使探测器的使用寿命显著增加,且探测器性能得到优化。目前,这款 $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ 探测器可实现年产 2000 支的生产能力。

5 展望

以 $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ 规格为代表的第二代碲镉汞焦平面探测器的工艺日益成熟,性能也趋于理论极限。因此,新一代红外探测器聚焦

于集小尺寸、轻重量、高性能、低功耗和低成本为一体的技术特点,而且近十年来小像素、多光谱、数字化和雪崩探测器技术的持续进步为新一代碲镉汞红外探测器的发展奠定了良好的基础^[4]。高德红外公司研制的 $1280 \times 1024/12 \mu\text{m}$ 碲镉汞中波红外探测器就是典型的第三代红外探测器。可预见的是,随着高端装备对高性能器件的需求愈来愈大,新一代探测器将在未来的应用中扮演更多、更重要的角色。

参考文献

- [1] Shen S C. MCT Versus Quantum Well Structures for IR Detectors [J]. *Semiconductor Science Technology*, 1993, **8**(1S): 443-446.
- [2] Chen G B, Lu W, Cai W Y, et al. Optimizing Boron Implantation Dose of HgCdTe Infrared Detectors [J]. *Acta Physics Sinica*, 2004, **53**(3): 912-914.
- [3] Breniere X, Tribolet P. IR Detectors Design and Approach for Tactical Applications with High Reliability Without Maintenance [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 6940H.
- [4] 丁瑞军,杨建荣,何力,等. 碲镉汞红外焦平面器件技术进展 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(1): 01003010.