

文章编号: 1672-8785(2022)02-0001-06

10 μm 间距长波 1280 $\times$ 1024 碲镉汞 探测器研制进展

祁娇娇 冯晓宇 陈彦冠 宁 提

刘世光 孙 浩 康 键

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着红外技术的进步, 红外探测器组件向着更小尺寸、更高分辨率的方向发展。小像元间距、大面阵规格是长波探测器发展的重要方向。通过对 10 μm 像元间距、9 μm 截止波长、1280 $\times$ 1024 阵列规格长波探测器的研究, 突破了 10 μm 间距长波像元成结技术、10 μm 像元间距铟柱制备及互连技术, 制备了有效像元率大于等于 99.4%、非均匀性小于等于 4% 的 10 μm 间距长波 1280 $\times$ 1024 碲镉汞探测器芯片。

关键词: 小间距; 1280 $\times$ 1024; 长波; 碲镉汞

中图分类号: TN3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.02.001

Development of Long-Wavelength 1280 $\times$ 1024 HgCdTe Detectors with 10 μm Pitch

QI Jiao-jiao, FENG Xiao-yu, CHEN Yan-guan, NING Ti,

LIU Shi-guang, SUN Hao, KANG Jian

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: With the advancement of infrared technology, infrared detector assemblies are developing towards smaller size and higher resolution. Small pitch and large area array specifications are important directions for the development of long-wavelength detectors. Through the research of 10 μm pitch, 9 μm cut-off wavelength, and 1280 $\times$ 1024 long-wave detector arrays, breakthroughs have been made in 10 μm -pitch long-wavelength pixel junction technology, 10 μm -pitch indium column preparation and interconnection technology. A long-wavelength 1280 $\times$ 1024 HgCdTe detector chip with an effective pixel rate of 99.4% or more and a non-uniformity of less than or equal to 4% has been developed.

Key words: small pitch; 1280 $\times$ 1024; long-wavelength; mercury cadmium telluride

收稿日期: 2021-10-12

作者简介: 祁娇娇(1988-), 女, 河北衡水人, 高级工程师, 主要从事红外器件方面的研究。

E-mail: qjj_711@163.com

0 引言

作为目前发展迅猛的高新技术之一,红外技术在军事领域的优势主要体现在以下几个方面:(1)红外技术通过获取目标对象的红外信号对其进行成像、监视、侦查、制导等,具有“单向透明”的优势;由于红外波段的特性,红外探测器的作用距离远,能够穿透薄雾和烟尘,是全黑环境和低能见度条件下的“夜视眼”。(2)红外探测器被动接收场景目标辐射的红外信号,利用场景信号差、发射率差和反射率差来识别伪装目标、感知目标状态、探测隐身目标,具有较高的隐蔽性和抗干扰性。(3)与雷达等探测系统相比,红外探测系统具有精度高、体积小、重量轻、功耗低等优点,便于集成在手持、机载等武器装备和武器平台中^[1]。

为了满足现代高科技战争的作战要求,通过在高技术化装备中集成红外热像仪,可实现夜间以及低能见度条件下的观察和侦查,也可用于发现伪装目标。随着装备高技术化和小型化的发展,小间距、大面阵是第三代红外焦平面探测器研究的必然趋势。针对武器装备对红外探测器的需求,本文研究了 $10\text{ }\mu\text{m}$ 间距长波 1280×1024 碲镉汞探测器的技术路线及制备技术。

1 国内外研究现状

第三代凝视型焦平面阵列推动了红外技术的进步。与前一代产品相比,它们增加了探测单元数量,取消了光机扫描器,是红外技术发展的一次重要革命。随着第三代红外探测技术的发展,增加低温目标的识别距离、提高成像清晰度、扩大波长范围成为第三代红外探测器发展的重要方向^[2]。

2015 年,国外文献报道中对最小像元间距的限制进行了分析。光学系统是像元间距减小的限制因素之一。通常使用艾瑞斑衍射极限作为最小像元间距的判据。当点源的两个艾瑞斑的重合位置位于振幅 73.5% 位置时,像元

间距最小,即 $p=0.61\lambda F/\#$ 。然而艾瑞判据仅是作为分辨率和剩余调制存在的度量单位。实际上,当两个艾瑞斑间隔 16% 时,点源可被识别。根据 Sparrow “Undulation Condition” 原则,最小像元间距 p 为 $0.5\lambda F/\#$ 。因此, $10\text{ }\mu\text{m}$ 像元间距可以满足工作波长为 $9\text{ }\mu\text{m}$ 的探测器的最小间距限制。图 1 所示为 Rayleigh 和 Sparrow 两种条件下的衍射点传播函数和像元间距^[4]。

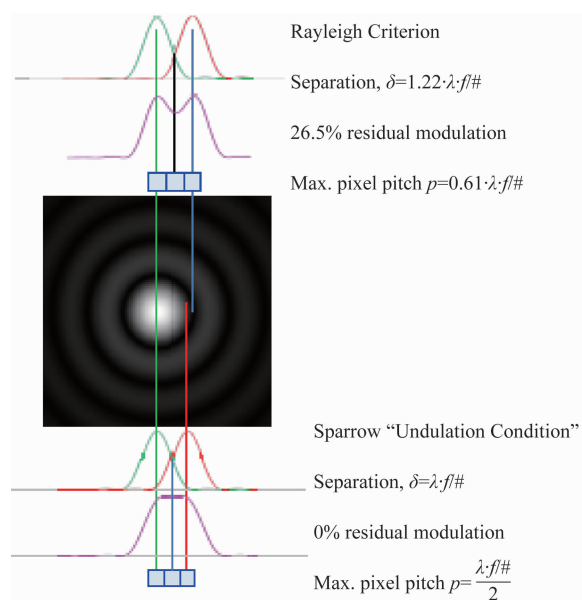


图 1 Rayleigh 和 Sparrow 两种条件下的衍射点传播函数和像元间距

国外从事小间距长波凝视型焦平面阵列研制的国家主要有美国、法国、德国、英国等发达国家。经过多年来的发展,其技术已经较为成熟。

1.1 法国 Sofradir 公司

法国 Sofradir 公司的制冷型红外探测器处于世界领先地位。通过三十年的发展,该公司研制基于碲镉汞的 n-on-p 平面结红外探测器。近年来,探测器向更小像元间距、更高工作温度发展。他们成立了联合实验室,致力于研制高性能的新一代红外探测器(碲镉汞 p-on-n、II 类超晶格、量子阱)。2012 年, Sofradir 公司制备了性能优良的像元间距为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的 640×512 长波红外探测器。在 90 K 下,该探测器

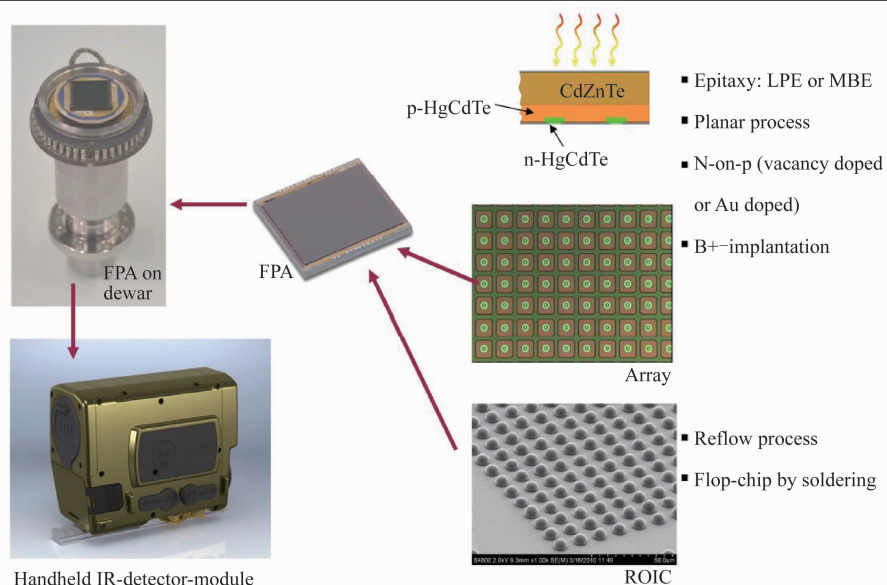


图 2 AIM 公司的红外焦平面技术路线

的温度噪声等效温差 (Noise-Equivalent Temperature Difference, NETD) 可以达到 13 mK。像元间距为 $10\ \mu\text{m}$ 的红外探测器处于研制阶段。通过测试芯片发现, $10\ \mu\text{m}$ 间距探测器芯片的暗电流密度和 $15\ \mu\text{m}$ 间距长波探测器暗电流密度相当, $10\ \mu\text{m}$ 探测器的调制传递函数在 0.37 ~ 0.48 之间^[3]。

1.2 德国 AIM 公司

2015 年, 德国 AIM 公司制备出像元间距为 $12\ \mu\text{m}$ 的 1280×720 碲镉汞长波红外焦平面探测器组件。它的工作温度为 70 K, 截止波长为 $9\ \mu\text{m}$, NETD 为 26 mK, 有效像元率大于 99%。读出电路工艺线宽为 $0.18\ \mu\text{m}$, 8 通道模拟输出; 采用 MIM 电容结构保障小像元下读出电路具备高电荷处理能力。图 2 所示为 AIM 公司大面阵凝视探测器的技术路线, 包括液相外延碲镉汞长波材料、n-on-p 型 B 注入平面成结技术、钢柱倒装互连结构^[7]。

1.3 美国

美国研制凝视焦平面阵列的公司主要包括 Teledyne、Rockwell 和 DRS 公司。其中, Teledyne 公司研制的 2048×2048 长波红外焦平面组件用于近地天体相机 (NEOCam)。他们在碲锌镉衬底上制备碲镉汞外延膜层; 探测器芯片与读出电路互连后, 将碲锌镉减薄到 $30\ \mu\text{m}$ 。

2048×2048 组件具有拼接式和单片式两种。表 1 列出了 Teledyne 公司 2048×2048 产品的参数指标^[9]。

表 1 Teledyne 公司 2048×2048 产品的参数指标

	NEOCam 指标	H2RG-18694
探测器材料	HgCdTe; CdZnTe 衬底减薄	HgCdTe; CdZnTe 衬底减薄
阵列规模	2048×2048 拼接	2048×2048 单片
截止波长	$>10\ \mu\text{m}$	$9.6\ \mu\text{m}$
应用状态	产品	在研

DRS 公司在 2014 年研制了像元间距为 $5\ \mu\text{m}$ 的 1280×720 碲镉汞长波红外焦平面探测器组件。它的工作温度为 80 K、有效像元率大于 99%、NETD 小于 30 mK, 器件结构为环孔结构 (High-Density Vertically Integrated Photodiode, HDVIP)。通过在液相外延 p 型 HgCdTe 上用离子束刻蚀工艺刻穿碲镉汞膜层来形成通孔, 并利用离子束刻蚀损伤形成环形的 n 型 HgCdTe 区域, 进而形成 p-n 结。图 3 为 HDVIP 结构的示意图。图 4 为像元间距为 $5\ \mu\text{m}$ 的 1280×720 芯片的照片及成像图^[8]。

1.4 英国 Selex ES 公司

英国 Selex ES 公司研制出 EAGLE 型长波 640×512 碲镉汞焦平面阵列组件。它的光敏

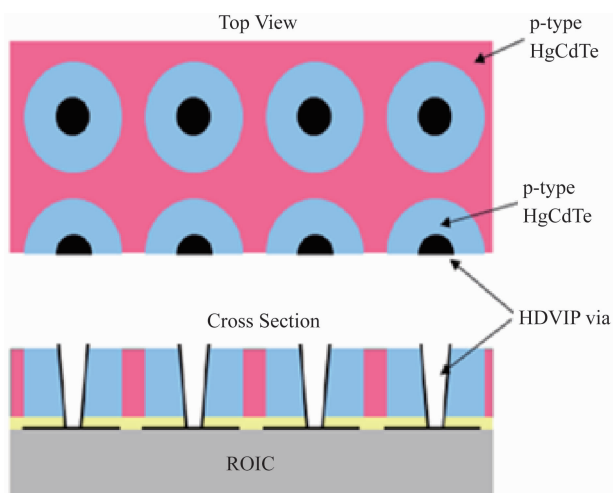


图 3 HDVIP 结构的示意图^[8]

元中心间距为 $16\ \mu\text{m}$ 、NETD 为 $24\ \text{mK}$ 、截止波长为 $10\ \mu\text{m}$ 、有效像元率大于 99%、响应率非均匀性小于 10%，适配斯特林制冷机，应

用于 EAGLE LWIR 系统。他们采用金属有机化合物化学气相沉积 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 方法外延制备碲镉汞长波材料，并实现了 p-on-n 型台面异质成结技术以及钢柱倒装互连结构 (见图 5)^[4]。

1.5 国内进展

经过近 20 年的时间，国内制冷型红外探测器发展迅速。长波凝视型焦平面阵列的研制单位有中国电科 11 所、昆明物理研究所和中国科学院上海技术物理研究所。其中，中国电科 11 所的长波凝视型焦平面探测器包括 256×256 ($30\ \mu\text{m}$ 间距)、 320×256 ($30\ \mu\text{m}$ 间距)、 640×512 ($25\ \mu\text{m}$ 间距)、 1280×1024 ($25\ \mu\text{m}$ 间距)、 640×512 ($15\ \mu\text{m}$ 间距)。2020 年开始研制 1280×1024 ($10\ \mu\text{m}$ 间距) 制冷型红外探测器。

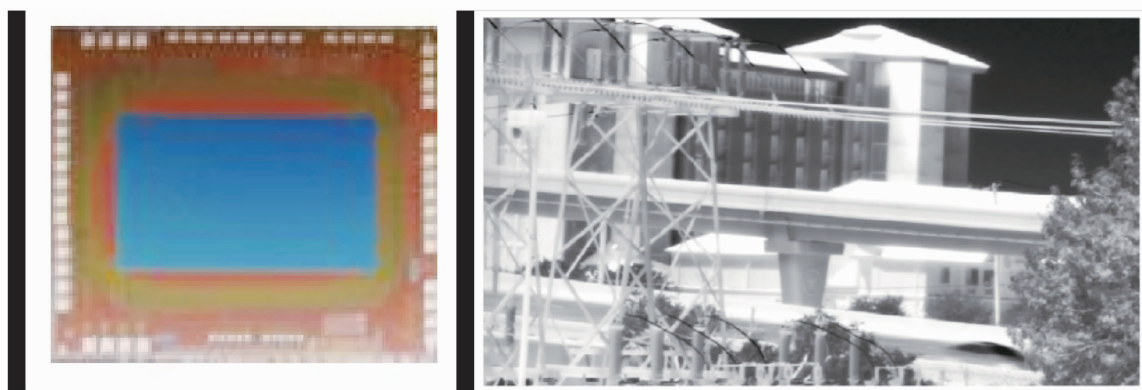


图 4 像元间距为 $5\ \mu\text{m}$ 的 1280×720 芯片的照片及成像图^[8]

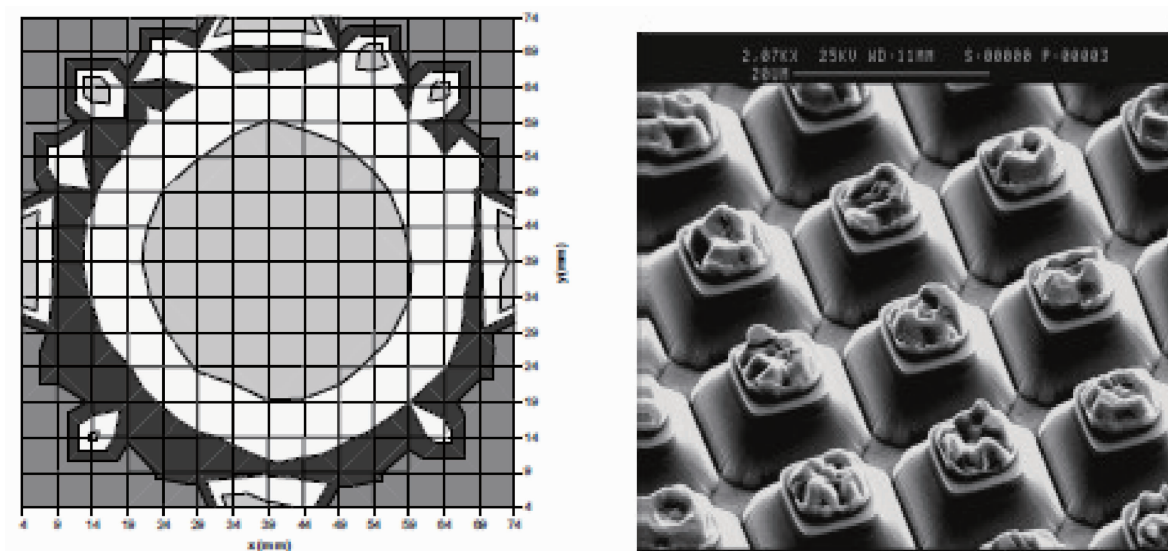
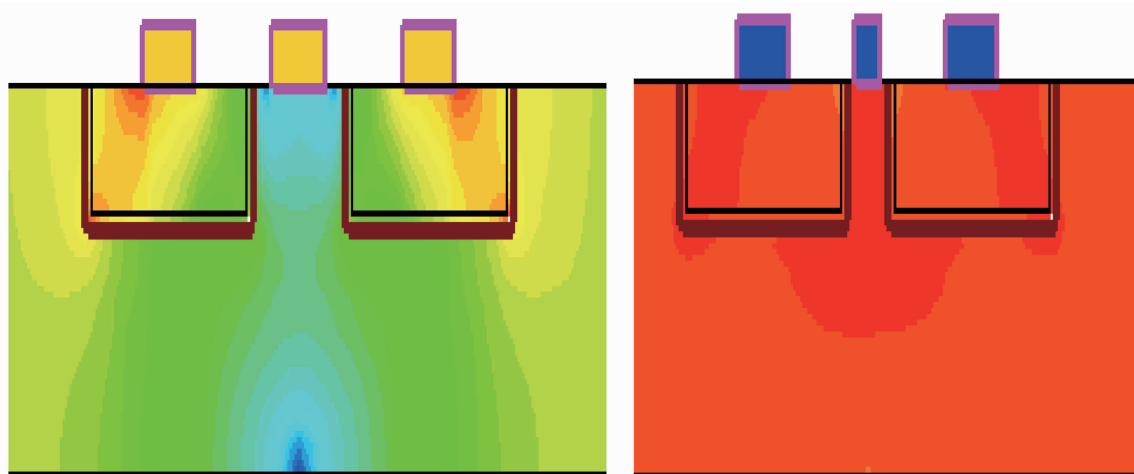


图 5 6 in 材料截止波长图及钢柱扫描电镜图^[4]

图 6 10 μm 间距长波二极管的电流分布

2 器件设计

2.1 结构设计

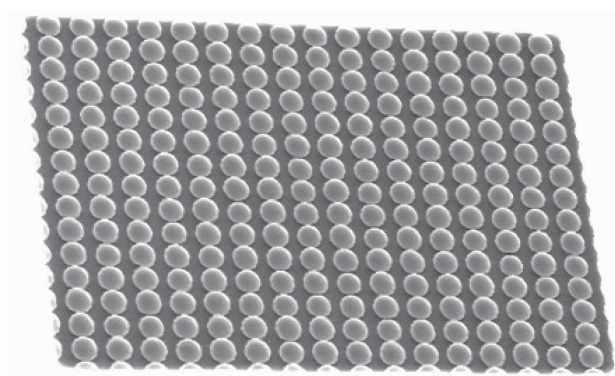
对于平面结的光敏二极管来说, 结构设计是其制备的前提。使用 Sentaurus TCAD 仿真软件对光敏二极管进行了参数设计。通过对 N⁺区结深、P 区浓度、N⁺区浓度等参数进行仿真, 最终确定了 9 μm 波长探测器扩散后的 N 区宽度、P 区浓度和最优结深。图 6 为不同间距条件下二极管的串音结构示意图。

2.2 注入区尺寸设计

碲镉汞材料经过高温热处理后表征为本征 P 型。通过 B 离子高能注入形成 N⁺掺杂区。碲镉汞材料经高能离子轰击后, 在注入区边缘形成损伤层 N⁻区, 同时重掺杂的 B 离子扩散也会形成 N⁻区。当注入区尺寸过大时, 相邻像元的 N⁻区相连, 相邻像元形成串音。当注入区尺寸过小时, 单个像元信号过小, 影响探测器的噪声等效温差等参数。为了获得性能良好的 10 μm 长波探测器的像元尺寸, 对探测器的离子注入工艺进行了设计。

2.3 互连工艺

读出电路与探测器通过钢凸点进行耦合。由于像元间距减小, 10 μm 间距 1280 $\times$ 1024 探测器芯片互连难点主要包括小间距高一致性钢凸点制备(见图 7)和高平整度探测器芯片制备。通过光刻精度提升、钢层生长优化、芯片平坦化以及高精度对准工艺控制, 提高了互连

图 7 10 μm 间距探测器的钢柱形貌图

导通率(大于等于 99.9%)。

3 器件性能测试及评价

通过技术突破, 我们制备了 10 μm 间距长波 1280 $\times$ 1024 碲镉汞探测器芯片。在高真空杜瓦封装后耦合微型制冷机, 并使用红外探测器测试系统进行了组件性能测试。制冷机的工作温度为 77 K, 探测器的有效像元率大于等于 99.4%, 非均匀性小于等于 4%。图 8 为芯片电平图。基于数据可判定, 该技术路线可以制备性能良好的小间距碲镉汞红外探测器。

4 结束语

随着红外技术的进步, 红外探测器组件向着更小尺寸、更高分辨率的方向发展。小像元间距、大面阵规格是长波红外探测器发展的重要方向。通过技术积累和攻关, 中国电科 11 所突破 10 μm 像元间距、9 μm 截止波长、1280 $\times$ 1024 阵列规格长波红外探测器的制备(有效像元



图 8 10 μm 间距长波 1280 $\times$ 1024 探测器的电平图
率大于等于 99.4%，非均匀性小于等于 4%），
为小间距长波碲镉汞探测器的研制打下了坚实
的基础。进一步提高小间距长波碲镉汞探测器
性能及批量生产能力是下一步的研制重点。

参考文献

- [1] 侯旺, 孙晓亮, 尚阳, 等. 红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势 [J]. *红外技术*, 2015, **37**(1): 1–10.
- [2] 赵江. 红外探测技术的现状与发展趋势 [J]. *船舶电子工程*, 2007, **77**(1): 32–36.
- [3] Rubaldo L, Taalat R, Berthoz J, et al. Latest Improvements on Long Wave p-on-n HgCdTe Technology at Sofradir [C]. *SPIE*, 2017, **10177**: 101771E.
- [4] McEwen R K, Jeckells D, Bains S, et al. Developments in Reduced Pixel Geometries with MOVPE Grown MCT Arrays [C]. *SPIE*, 2015, **9451**: 94512D.
- [5] 翟树礼. 碲镉汞的离子注入 [J]. *红外与激光技术*, 1987, **15**(1): 39–50.
- [6] 王忆峰, 刘黎明, 孙祥乐, 等. 碲镉汞材料表面钝化研究 [J]. *红外*, 2012, **33**(3): 1–8.
- [7] Ziegler J, Bitterlich H, Breiter R, et al. Large-Format MWIR and LWIR Detectors at AIM [C]. *SPIE*, 2013, **8704**: 87042L.
- [8] Armstrong J M, Skokan M R, Kinch M A, et al. HDVIP Five-micron Pitch HgCdTe Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2014, **9070**: 907033.
- [9] Dorn M, McMurtry C, Pipher J, et al. A Monolithic 2k $\times$ 2k LWIR HgCdTe Detector Array for Passively Cooled Space Missions [C]. *SPIE*, 2018, **10709**: 1070907.