

文章编号: 1672-8785(2024)04-0001-06

大幅宽多谱段高光谱红外 探测器研究

王经纬 王晓龙 付志凯 张智超 孟令伟

(华北光电技术研究所焦平面技术研究部, 北京 100015)

摘 要: 报道了基于分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)技术的大幅宽、多谱段、大像元高光谱红外探测器的最新研究进展。采用 MBE 技术制备出高质量 MCT 材料; 采用成熟的 n-on-p 技术路线制备探测芯片, 并针对特殊形状的大像元进行了优化; 高光谱专用读出电路设计针对短波、窄谱段、小信号等典型特征进行了优化, 并针对光谱应用加入行增益可调等功能设计。测试结果表明, 组件基本性能良好, 有效像元率大于 99.5%, 平均量子效率优于 70%。

关键词: 高光谱; 红外探测器; 碲镉汞; 分子束外延

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.04.001

Research on Large-Width Multi-Band Hyperspectral Infrared Detectors

WANG Jing-wei, WANG Xiao-long, FU Zhi-kai, ZHANG Zhi-chao, MENG Ling-wei

(Focal Plane Technology Research Department, North China Research

Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The latest research progress of large-width, multi-band, large-pixel hyperspectral infrared detectors based on molecular beam epitaxy (MBE) mercury cadmium telluride (MCT) technology is reported. High-quality MCT materials are fabricated by MBE technology. For the fabrication of the detector chips, the well-established n-on-p technology route is employed, with optimizations made for large pixels with special shapes. The readout circuits, specifically designed for hyperspectral applications, have been tailored for typical characteristics such as short wavelengths, narrow spectral bands, and small signals, incorporating features like gain-selection-by-line function for spectral applications. The test results show that the basic performance of the module is good, with an operability greater than 99.5% and an average quantum efficiency greater than 70%.

Key words: hyperspectral; infrared detector; mercury cadmium telluride; molecular beam epitaxy

收稿日期: 2023-11-28

作者简介: 王经纬(1983-), 男, 辽宁海城人, 高级工程师, 主要从事分子束外延技术及红外探测器技术研究。
E-mail: wjwsgdte@163.com

0 引言

作为一种先进的光学分析方法, 高光谱技术通过捕获和分析不同波长的光来揭示物质的属性和状态。与传统的成像技术不同, 高光谱技术能够为每个像素提供一个光谱, 从而获取大量的连续波长范围的信息。这种技术的独特之处在于, 它不仅能提供图像的空间信息, 而且还能提供图像的光谱信息, 使我们能够更深入地理解图像中对象的材料属性和环境条件^[1-2]。

高光谱技术的历史可以追溯到 20 世纪 80 年代。随着时间的推移, 它已经成为农业、环境科学、军事、宇航等许多领域的重要研究和应用工具。尤其是随着传感器技术和计算能力的不断进步, 高光谱技术的应用也在不断拓展和深化。在高光谱技术的众多应用中, 高光谱红外探测器是一个独特且重要的组成部分。

红外波段的光具有独特的穿透能力和物质识别能力, 使得高光谱红外探测器能够在众多领域发挥重要作用。例如, 它可以用于农业监测中的作物健康分析、军事领域的目标检测与识别以及宇航领域的地球和大气观测。

随着近些年极端天气不断出现, 温室气体被认为是重要原因之一。在应对气候变化和推进减碳目标的全球努力中, 高光谱探测器在温室气体监测方面的应用显得尤为重要。它能够准确监测这些复杂排放源, 为制定和执行有效的减排策略提供科学依据。此外, 随着碳交易市场的发展, 准确的温室气体监测、报告和验证成为实现碳市场成功的关键。高光谱探测器通过提供精确的排放数据, 支持这一市场的有效运作, 确保碳信用额的真实性和有效性。这对于公司或个人通过购买碳信用额以抵消其温室气体排放至关重要, 有助于推动全球范围内的减排措施, 并为发展中国家提供必要的气候行动融资。

综上所述, 高光谱探测器不仅在监测工业领域的排放中发挥着至关重要的作用, 而且也是支持全球碳交易市场有效运作的关键技术。

通过提供准确和可靠的数据, 这些先进的探测器帮助实现全球减碳目标, 促进气候变化应对措施的发展和实施。

传统的短波高光谱红外探测器在光谱维通常为 256/512 通道、每通道谱段宽 10 nm 左右, 但定量计算、反演温室气体/大气污染物探测需要更高的光谱精度。在二氧化碳、甲烷等温室气体以及二氧化氮、一氧化碳、气溶胶等大气污染物的典型吸收峰附近, 需要将每个谱段细分为几纳米甚至零点几纳米, 因而需要更多的光谱维通道。

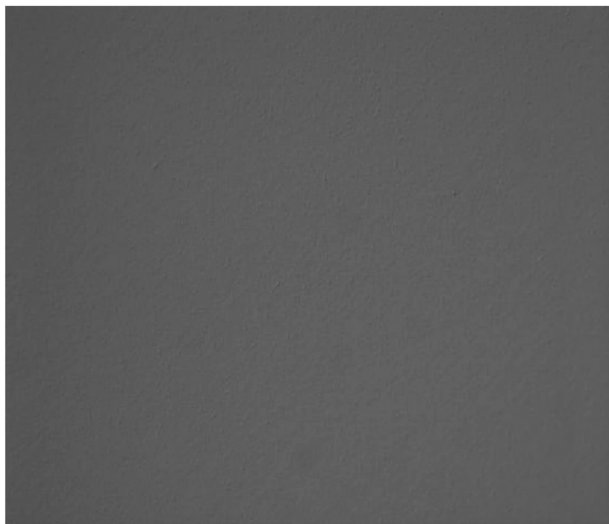
本文报道了中国电子科技集团公司第十一研究所(以下简称“中国电科 11 所”)基于前期 1024×256 高光谱探测器组件的技术积累^[3], 结合丰富的宇航用红外探测器组件研制经验及在轨数据, 采用分子束外延材料技术研制出像元数为 1536×1024 、像元尺寸为 $24 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ 的单片式大幅宽、多谱段短波高光谱红外探测器组件; 在 100 K 的工作温度下, 对该组件进行了光电性能表征并将其与国内外典型产品进行了对比。

1 材料生长及器件制备

沿用中国电科 11 所成熟的 3 in 硅基 MCT 材料路线, 采用芬兰 DCA 公司生产的 P600 型分子束外延系统制备 MCT 材料; 针对短波高光谱典型谱段 900~2600 nm 或 400~2600 nm, 材料组分为 0.438@100 K; MCT 汞吸收层材料外延完成后, 经原位钝化碲化镉后取出。

通过材料性能优化设计和工艺优化设计, 材料质量已经稳定控制在较高水平, 表面宏观缺陷($\geq 1 \mu\text{m}$)密度控制在 100 个/ cm^2 以内(见图 1), X 射线双晶衍射半峰宽控制在 80 arcsec 左右, 位错密度为 $1 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$, 与国际报道水平相当^[4-8]。

芯片制备采用平面注入成结, 先后经过退火、光刻、注入、刻蚀、电极生长等工艺。针对 $24 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ 大像元优化了注入区。注入及驱动退火后, 在典型工作反偏电压下, 空间电荷区与像元尺寸几乎重合, 保证了组件的高

图 1 材料表面的显微镜图($\times 200$ 倍)

占空比。

1536×1024 ($24 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ 像元尺寸) 高光
谱组件的芯片版图如图 2 所示。

2 高光谱专用读出电路优化

在短波高光谱红外探测器的典型应用场景
(通常为短波红外(典型覆盖 $900 \sim 2600 \text{ nm}$) 或
可见短波宽光谱响应($400 \sim 2600 \text{ nm}$)) 中, 光

谱通常被划分为几十纳米至几纳米的窄谱段,
每个谱段内的信号很小, 通常为 $1 \times 10^4 \sim 2 \times$
 10^5 个光子。因此, 高光谱专用读出电路通常
需要具有大增益、低噪声、高注入效率等特
点。

针对以上设计要求, 输入级采用电容反馈
跨阻放大器 (Capacitive Transimpedance Ampli-
fier, CTIA) 结构, 放大像素产生的电荷信号、
提高增益; 加入相关双采样 (Correlated Double
Sampling, CDS) 结构, 降低固定模式噪声。

在版图设计中, 将模拟电源、模拟地、数
字电源、数字地以及低速、高速电源严格分
开, 再通过外部相连, 减小数字电路通过衬底
耦合对模拟电路的干扰, 降低噪声; 将采样电
容下极板单独接地, 避免与模拟和数字地混连
而引入不必要的噪声干扰。在关键信号通路上
都加入到电源或到地的滤波电容, 降低电路串
扰。版图布线中采用保护环和大面积铺地的方
式来隔离模拟信号通路及数字电路, 进一步抑
制噪声的影响; 同时采取数模隔离、衬底隔

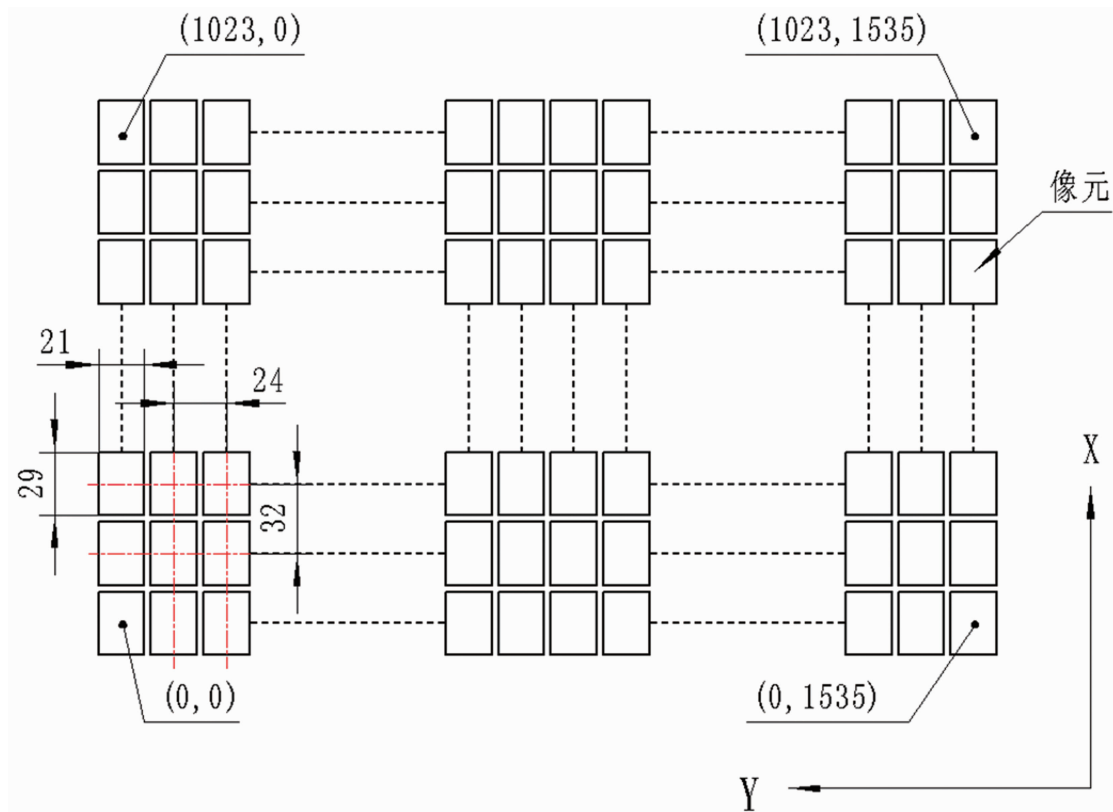


图 2 芯片版图示意图

离、地线隔离环、电源线分离等技术进一步控制噪声^[9-10]。此外,针对典型的宇航应用,增加了抗辐照设计。实测结果表明,抗辐照能力(总剂量)优于 100 krad(Si)。

通过上述优化措施,电路读出噪声达到 $85e^- @ 20 \text{ fF}$ 左右,输出线性度优于 99.5% (5%~95%满阱),可以满足短波/可见短波一体化高光谱探测的典型应用场景。

3 芯片封装、制冷机耦合与组件性能测试

后截止波长为 2600 nm 的短波/可见短波一体化高光谱红外探测器组件产品如图 3 所示。

将高光谱红外探测芯片封装到宇航级高可靠性真空杜瓦中,为芯片提供高真空工作环境;组件电学接口采用 2 个宇航级 51pin 真空

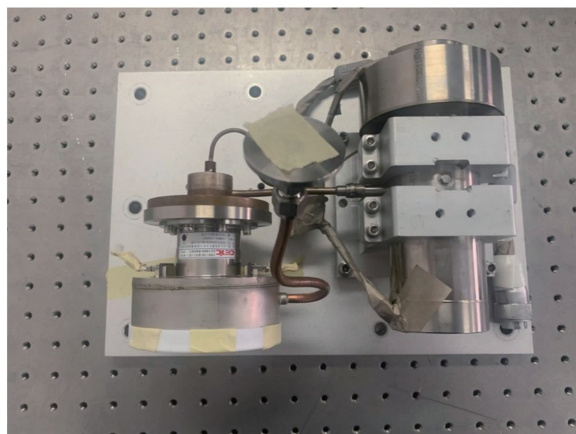


图 3 1536×1024 高光谱红外探测器组件

插件引出,光学接口依据北京空间机电研究所测试系统作出适配。杜瓦组件与中国科学院理化技术研究所研制的大冷量宇航级脉管制冷机耦合后形成探测器制冷组件。

经完整振动、冲击、加速度、抗辐照、电磁兼容性、抗位移损伤测试,制冷组件满足宇航用红外探测器组件使用要求。在 100 K 工作温度下对组件进行了测试表征(见图 4 和图 5)。典型光电指标如表 1 所示。可以看出,有效像元率、读出噪声、平均量子效率、响应率非均匀性、平均峰值探测率等核心光电指标均达到先进水平^[1-3]。

表 1 探测器的主要性能指标

性能参数	指标
探测器规格	1536×1024
像元尺寸	24 μm ×32 μm
光谱响应范围	400~2600 nm (可定制)
输入方式	CTIA
增益	20 fF (G1)、40 fF (G2)、 140 fF (G3)、160 fF (G4)
读出噪声	G1: $85e^-$, G2: $150e^-$, G3: $355e^-$, G4: $385e^-$
有效像元率	$\geq 99.5\%$ (连续盲元要求可定制)
工作模式	Snapshot
读出方式	IWR 或 ITR
响应率非均匀性	$\leq 10\%$
平均峰值探测率	$2.1 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$
平均量子效率	70.6%
帧频	255 Hz
满阱输出电压	2 V

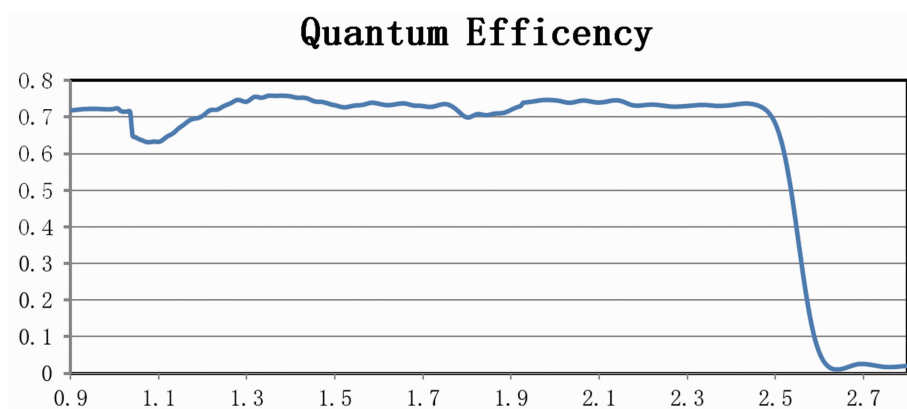


图 4 高光谱组件(900~2600 nm)的量子效率曲线

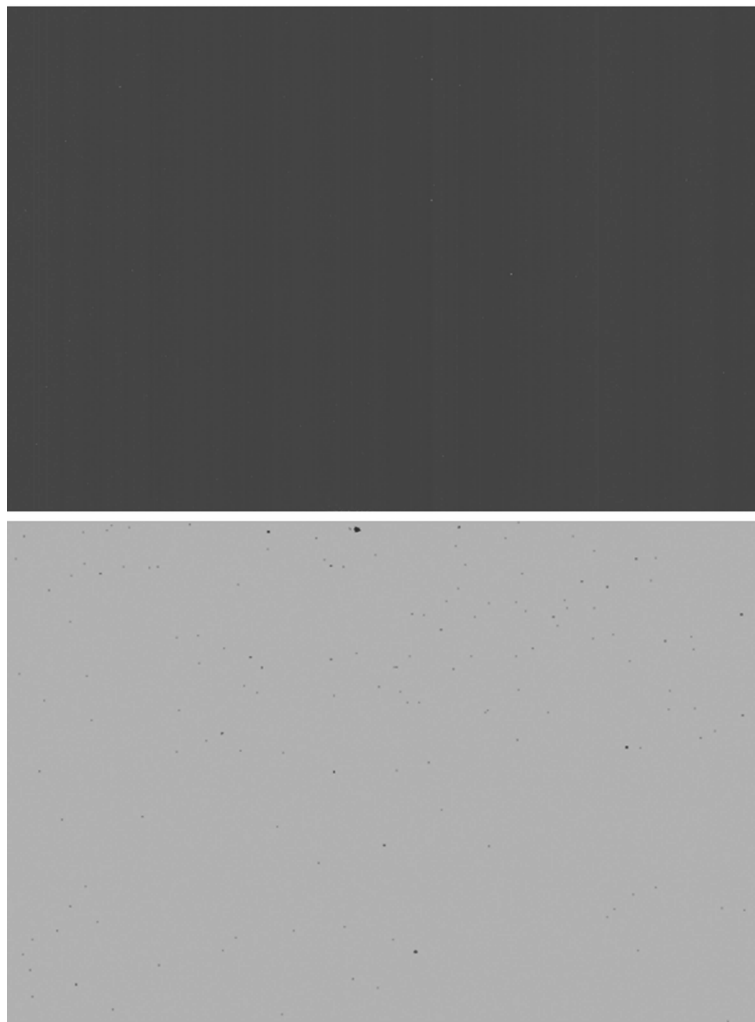


图 5 组件电平测试结果及盲元分布

4 结束语

针对宇航用大幅宽、多谱段高光谱探测应用, 中国电科 11 所基于分子束外延技术研制出像元数为 1536×1024 、像元尺寸为 $24 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ 的短波/可见短波一体化高光谱红外探测器组件。分子束外延 MCT 材料质量与国际报道的水平相当; 探测器芯片针对特殊像元尺寸进行了针对性设计, 提高了光敏区占空比; 高光谱专用读出电路针对短波、窄谱段、小信号等典型应用特征进行了针对性优化设计; 对耦合后的高光谱探测器制冷组件进行了较全面的性能评价。结果表明, 有效像元率大于 99.5%, 平均量子效率优于 70%, 读出噪声达到 $85\text{e}^- @ 20 \text{ fF}$ 左右, 主要光电性能与国际报道水平相当。

将探测器应用于高光谱相机进行成像测试等工作正在进行中, 相关内容将在后续论文中作详细介绍。

参考文献

- [1] Jia J X, Wang Y M, Chen J S, et al. Status and Application of Advanced Airborne Hyperspectral Imaging Technology: A Review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **104**: 103115.
- [2] Lu B, Dao P D, Liu J G, et al. Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(16): 2659.
- [3] 李忠贺, 董晨, 李春领, 等. 高光谱红外探测器组件的研究进展 [J]. *红外*, 2020, **41**(9): 1-14.

- [4] Yang B, Xin Y, Rujirawat S, et al. Molecular Beam Epitaxial Growth and Structural Properties of HgCdTe Layers on CdTe(211)B/Si(211) Substrates [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **88**(1): 115–119.
- [5] 高达, 王经纬, 王丛, 等. 低缺陷 Si 基碲镉汞分子束外延工艺研究 [J]. *红外*, 2018, **39**(10): 12–15.
- [6] 高达, 王经纬, 王丛, 等. 分子束外延硅基碲镉汞材料技术研究现状 [J]. *红外*, 2019, **40**(8): 15–18.
- [7] 王经纬, 李忠贺, 高达, 等. 短/中波双色碲镉汞红外探测器制备研究 [J]. *红外*, 2021, **42**(2): 1–7.
- [8] 高达, 李震, 王丛, 等. 基于分子束外延的 4 in 硅基碲镉汞材料工艺研究 [J]. *红外*, 2021, **42**(3): 6–10.
- [9] 卓毅, 岳冬青, 李敬国, 等. 短波高光谱红外焦平面系统电路设计 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(11): 1382–1385.
- [10] 王静, 刘兴新, 李冬冰, 等. CTIA 线列型读出电路输出异常问题研究 [J]. *激光与红外*, 2022, **52**(6): 914–917.