

文章编号: 1672-8785(2024)07-0009-07

一种多谱段 TDI 线列制冷 红外探测器

王晓龙 李冬冰 袁 媛 张 璐 冯志攀 王成刚

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 研制出一种多谱段时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)线列制冷红外探测器。探测器阵列规模达到 $1024 \times 4 \times 6$, 像元尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 。读出电路具有分谱段将转换成电信号的模拟信号串行输出、边积分边读出(Integrate While Reading, IWR)、TDI 以及盲元/闪元剔除功能。探测器芯片采用碲镉汞外延材料制造光伏二极管阵列, 封装采用高可靠性的全金属真空杜瓦, 制冷采用小型分置式斯特林制冷机。整机具备体型小、功耗低、响应波段宽、集成度高、启动时间短等优点。测试结果表明, 器件各谱段的盲元率小于 1%, 各谱段的噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)小于 30 mK, 各谱段的动态范围大于 70 dB, 各谱段的响应率非均匀性小于 5%, 各谱段的非线性度小于 2%, 器件行频大于 20 kHz。

关键词: 多谱段; 时间延迟积分; 噪声等效温差

中图分类号: TN2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.07.002

A Multispectral TDI Line Array Cooled Infrared Detector

WANG Xiao-long, LI Dong-bing, YUAN Yuan, ZHANG Lu, FENG Zhi-pan, WANG Cheng-gang

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: A multispectral time delay integration (TDI) line array cooled infrared detector is developed. The detector array has a scale of $1024 \times 4 \times 6$ and a pixel size of $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$. The readout circuit has the function of serial output of analog signals that are converted into electrical signals through spectral segmentation, and integrating while reading (IWR), TDI, and blind/flash element elimination. The detector chip is made of HgCdTe epitaxial material to manufacture a photovoltaic diode array, packaged with a highly reliable all-metal vacuum dewar, and cooled using a small split Stirling refrigerator. The whole machine has advantages such as small size, low power consumption, wide response band, high integration, and short startup time. The test results show that the blind element rate of each spectral segment of the device is less than 1%, and the noise equivalent temperature difference (NETD) is less than 30 mK, the dynamic range of each spectral segment is greater than 70 dB, the non-uniformity of the response rate of each spectral segment is less than 5%, the non-

收稿日期: 2023-09-12

作者简介: 王晓龙(1996-), 男, 北京人, 工程师, 主要研究方向为红外探测器性能评价与测试。

E-mail: 570184919@qq.com

linearity of each spectral segment is less than 2%, and the device line frequency is greater than 20 kHz.

Key words: multispectral; readout while integration; NETD

0 引言

多谱段红外探测器作为红外遥感卫星的核心部件,在对地观测方面发挥了重大作用。通过对目标的分波段探测再结合特殊算法,可消除探测信号中大气的影响,反演出准确的地表温度信息,从而实现对地球的资源探测、军事气象监测、环境监测以及灾害预警等。

目前,我国发射的多颗风云系列卫星、天宫一号、环境减灾卫星 1A/B 和高分五号卫星均搭载了多谱段线列红外探测器^[1-2]。美国在其近年发射的 MTI、Landsat 等卫星上也装备了 10.3~12.5 μm 多谱段红外探测器,用于地球表面干旱调查以及海洋、陆地温度监视等领域^[3]。

近年来,考虑到地球轨道资源的利用情况以及已发射遥感卫星在探测空间及探测性能上的不足,国内对多谱段集成红外探测器组件的需求越来越迫切。同时,在探测需求不断细化的应用背景下,用户也对多光谱红外探测器的探测性能提出了更高的要求。本文介绍了国内 6 谱段 TDI 线列制冷红外探测器的研究结果。

1 多谱段 TDI 线列制冷红外探测器整体设计

在红外成像应用中,当目标响应波段较宽时,单谱段成像对比度较低,不易分清目标与背景。通过 3 种材料及 6 块滤光片将响应波段范围细分,制造成多谱段红外探测器组件。各

个谱段分别成像,以达到更好的成像效果。

本文介绍的多谱段 TDI 线列制冷红外探测器的光谱覆盖范围为 3.0~5.0 μm 和 7.6~11.5 μm ,单片集成 6 个谱段。其中包括 3 个中波谱段(MW1、MW2、MW3)和 3 个长波谱段(LW1、LW2、LW3),每个谱段的阵列规格均为 1024×4。该款探测器具备体型小、功耗低、响应波段宽、集成度高、启动时间短等优点。

探测器的版图布局如图 1 所示。焦平面组件总体设计采用微杜瓦结构形式,主要由焦平面探测器、微杜瓦结构和线性分置式斯特林制冷机组成。红外探测器采用单电路集成 6 个子模块电路,分别互联 3 个中波器件和 3 个长波器件。以碲锌镉作为衬底,利用 HgCdTe 垂直液相外延及台面刻蚀工艺制造光电二极管,实现光电转换功能。读出电路的制造工艺为 0.18 μm 硅基互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺,主要分成数字电路和模拟电路:数字电路产生时钟信号,控制输出模式(增益、盲元替代、扫描方向);模拟电路将二极管采集的光电流进行电压转换及 TDI 处理。探测器与读出电路芯片通过倒装互联工艺实现连通。封装结构采用全金属微杜瓦结构:前端包含窗片和冷屏,用于控制入射光角度及能量;内部分波段安装滤光片,控制入射到各个谱段相对应的红外光谱,实现红外探测器的多波段响应特性。

表 1 国外多波段探测器性能参数

研制单位	美国 Raytheon 公司	法国 Lynred 公司
应用	MTI 相机	对地观测探测器
线列类型	单线列	多线列
阵列规模/元	720×1	600×3 1200×12
红外谱段集成数量	2 个电路: 8 个谱段采用	单电路: 4 个谱段采用
光谱覆盖范围/ μm	3~12.7	3~14

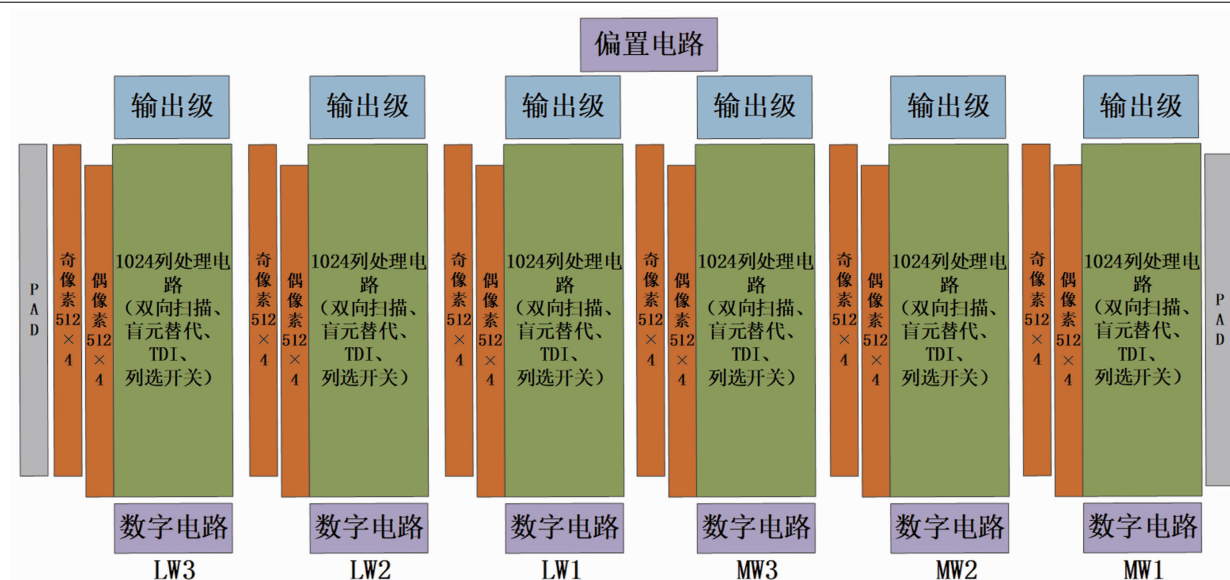


图 1 版图布局示意图

杜瓦结构通过冷指与制冷机进行耦合互联, 形成探测器制冷机组件。

2 多谱段 TDI 线列制冷红外探测器模块设计

2.1 电路设计

本电路采用 GF 0.18 μm 、电源电压 +5 V 工艺进行设计, 单芯片共集成 6 个线列电路。其中每个线列由 1024 个单通道电路(见图 2)构成, 主要包括输入级模块、盲元替代与双向扫描模块、TDI 级模块和输出级模块。

2.1.1 输入级模块

输入级模块在各谱段分别对中波信号和长波信号进行响应。采用 DI 结构, 在保证注入效率的同时, 实现小噪声和低功耗。

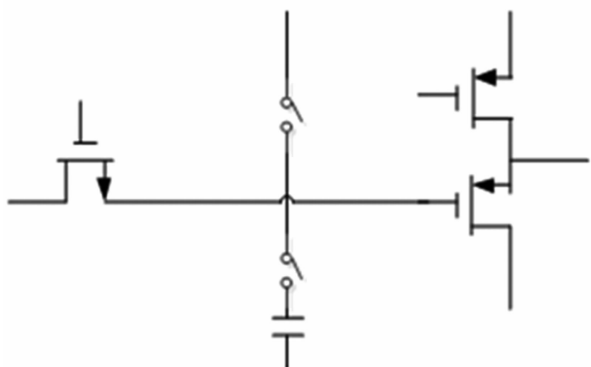


图 2 DI 输入级的示意图

2.1.2 盲元替代与双向扫描模块

盲元替代与双向扫描模块将数字信号通过串口的形式输入到电路中, 控制盲元替代及双向 TDI 扫描。在执行盲元替代时, 盲元会被替代为电路内部产生的固定电平, 且不参与信号的计算。同时, 为了保证输出的一致性, 该 TDI 通道的放大倍数自动变为 4/3。

2.1.3 TDI 级模块

TDI 电路采用开关电容结构, 如图 3 所示。前 3 个像元经过 2 级 TDI 传输, 最后 1 个像元经过 1 级 TDI 传输, 单通道共计 7 级 TDI (1 级 TDI 等于 1 个行周期)。由于光电流信号足够大, 因此 TDI 采用累加后平均的设计方法, 保证 3 元信号平均后不变, 噪声平均后变小, 从而提高信噪比。

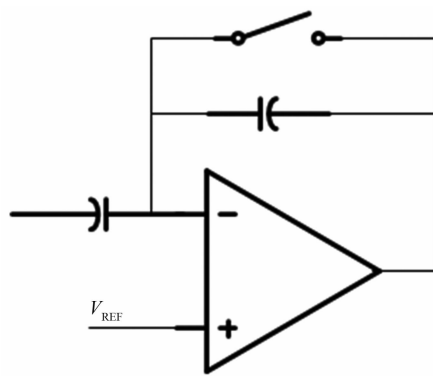


图 3 TDI 电路的示意图

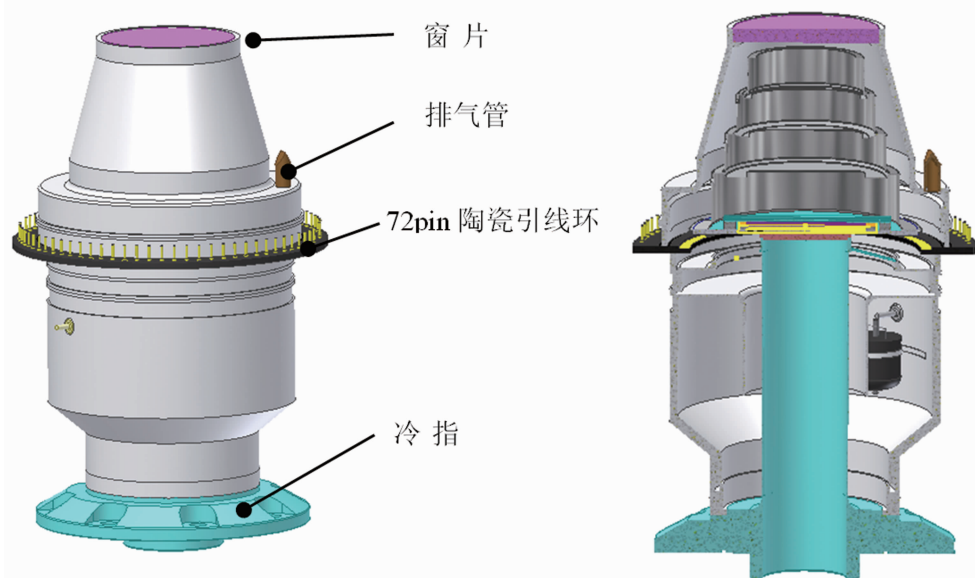


图 4 探测器杜瓦组件的外观及剖面图

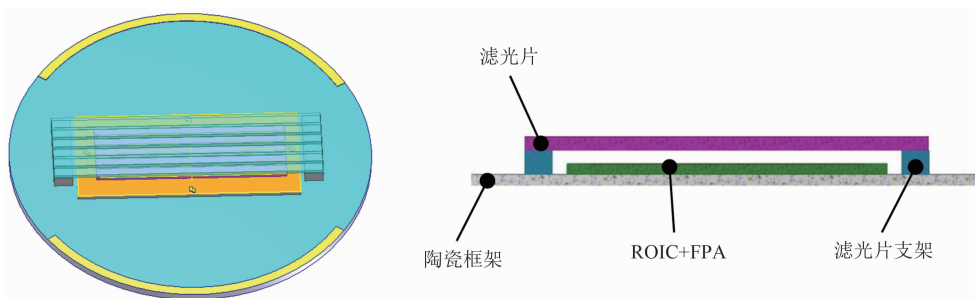


图 5 冷头结构设计图及剖视图

2.1.4 输出级模块

输出级模块由输出列选放大器和输出缓冲放大器构成，在时钟以及列选信号、通道选择模块的控制下，分 2/4/8 路分别有序输出 1~1024 个列像元信号。

2.2 器件设计

多波段(1024×3×6)HgCdTe 红外探测器组件的光谱响应波段要求为 3~4.2 μm (MW1)、4.3~5 μm (MW2)、3~5 μm (MW3)、7.7~10 μm (LW1)、7.7~11.5 μm (LW2)、10~11.5 μm (LW3)。6 个波段通过 3 种材料实现，其中 MW1、MW2、MW3 后截止波长大于 5 μm，LW1 后截止波长大于 10.5 μm，LW2、LW3 后截止波长大于 12 μm，以保证 11.5 μm 处的光谱响应。HgCdTe 薄膜材料的组分决定了 HgCdTe 器件的光谱响应特性，半导体材料禁带宽度与截止波长之间的关系为^[4]

$$\lambda = \frac{hC_0}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (1)$$

式中， h 为普朗克常数； C_0 为真空中的光速。结合禁带宽度 E_g 随 HgCdTe 材料组分 x 值和温度 T 的变化函数的经验公式^[5]，可以计算出探测器工作在不同温度下材料组分 x 值与器件响应截止波长之间的关系：

$$E_g = -0.302 + 1.93x - 0.810x^2 + 0.832x^3 + 5.354 \times 10^{-4}(1-2x)T_L \quad (2)$$

多谱段 TDI 线列制冷红外探测器制备的关键工艺主要包含垂直液相外延工艺、台面刻蚀工艺和倒装互联工艺。通过富汞垂直液相外延，将 As 原位掺杂并直接激活成 p 型受主；As 掺杂原子的激活率接近 100%，可以获得较高的掺杂浓度。通过台面刻蚀工艺，将原位掺杂生长的 HgCdTe 双层异质结红外材料隔离成光敏感元微台面阵列，以达到原位掺杂 p-n 结

隔断和公共基区保持连通的目的。通过优化刻蚀工艺,改进台面阵列的沟槽宽度和形状,实现了更高占空比的台面器件制备工艺,提升了器件的量子效率和性能。

2.3 封装设计

杜瓦采用全金属结构设计,由红外窗口、外壳、吸气剂(可重复电激活并持续维持杜瓦真空寿命)、引线环、芯柱、陶瓷框架和冷屏(限制视场角并消除杂散光)等部分组成,如图 4 所示。通过高可靠性超低漏率密封焊接、杜瓦内部安装电激活吸气剂以及在高温环境下长时间排气,保证组件的真空寿命。冷头结构设计和框架设计版图如图 5 所示。将探测器芯片粘接在陶瓷框架上,并通过支架将滤光片放置于芯片之上。

光谱分光采用滤光片分光方式。设计微组合滤光片安装支架,并将其集成到组件光学系

统内。采用粘接剂胶连方式将微组合滤光片安装至探测器焦面近端,滤光片下表面距离光敏面 0.8 mm,防止谱段滤光片间光串扰,以实现谱段精细分光。滤光片分光方案如图 6 所示。

3 多谱段 TDI 线列制冷红外探测器测试及成像

封装好的制冷焦平面探测器如图 7 所示。依据 GB/T17444-2013^[6]对 $1024 \times 4 \times 6$ 探测器的相关参数进行测试。探测器的测试参数如表 2 所示。结果表明,中波波段覆盖 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,长波波段覆盖 $7.7 \sim 11.5 \mu\text{m}$ 。器件的各谱段盲元率小于 1%,NETD 小于 30 mK,动态范围大于 70 dB,响应率非均匀性小于 5%,非线性度小于 3%,器件行频大于 20 kHz。制冷机功耗低于 80 W,降温时间小于 8 min。

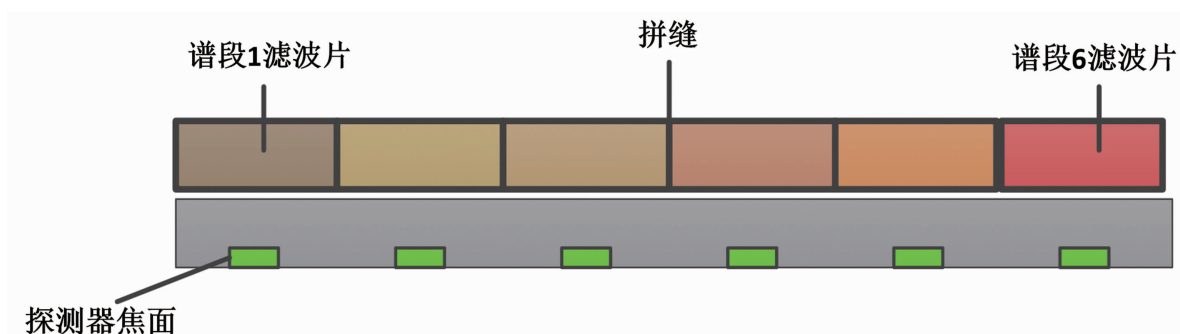


图 6 滤光片分布图

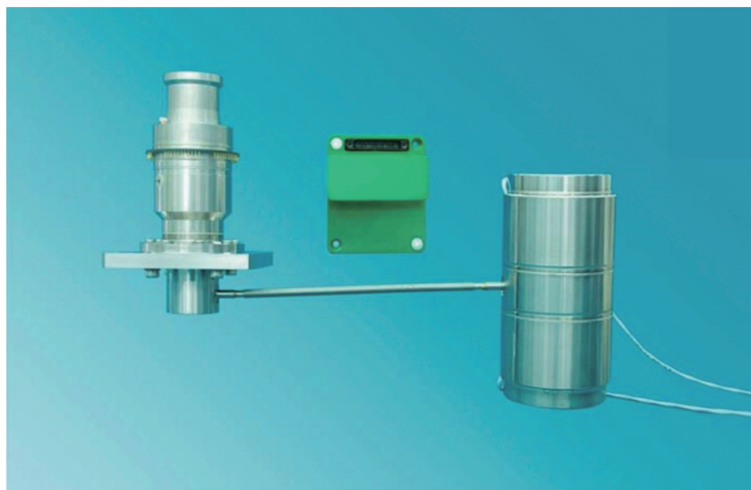


图 7 多谱段 TDI 线列制冷红外探测器组件的实物图

表 2 性能测试参数

参数	LW1	LW2	LW3	MW1	MW2	MW3
波长/ μm	7.72~9.84	7.72~11.47	9.60~11.49	3.06~4.22	4.32~4.99	3.08~4.95
噪声等效温差/mK	28.6	26.8	28.6	17.6	18.2	16.8
响应率非均匀性	4.60%	4.90%	4.72%	4.65%	4.54%	4.72%
有效像元率	99.30%	99.20%	99.10%	99.40%	99.60%	99.90%
行频/Hz	20k	20k	20k	20k	20k	20k
动态范围/dB	70.1	70.2	70.1	70.8	70.7	70.9
非线性度	1.68%	1.73%	1.85%	1.44%	1.64%	1.53%

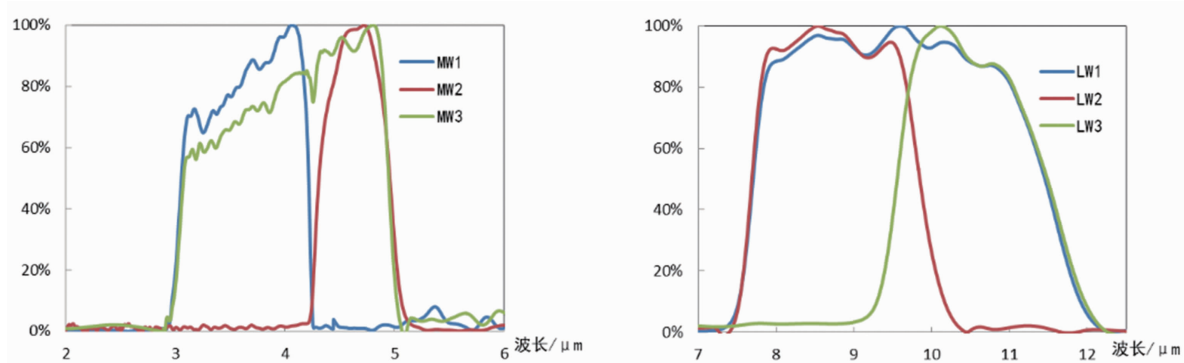


图 8 相对响应光谱图

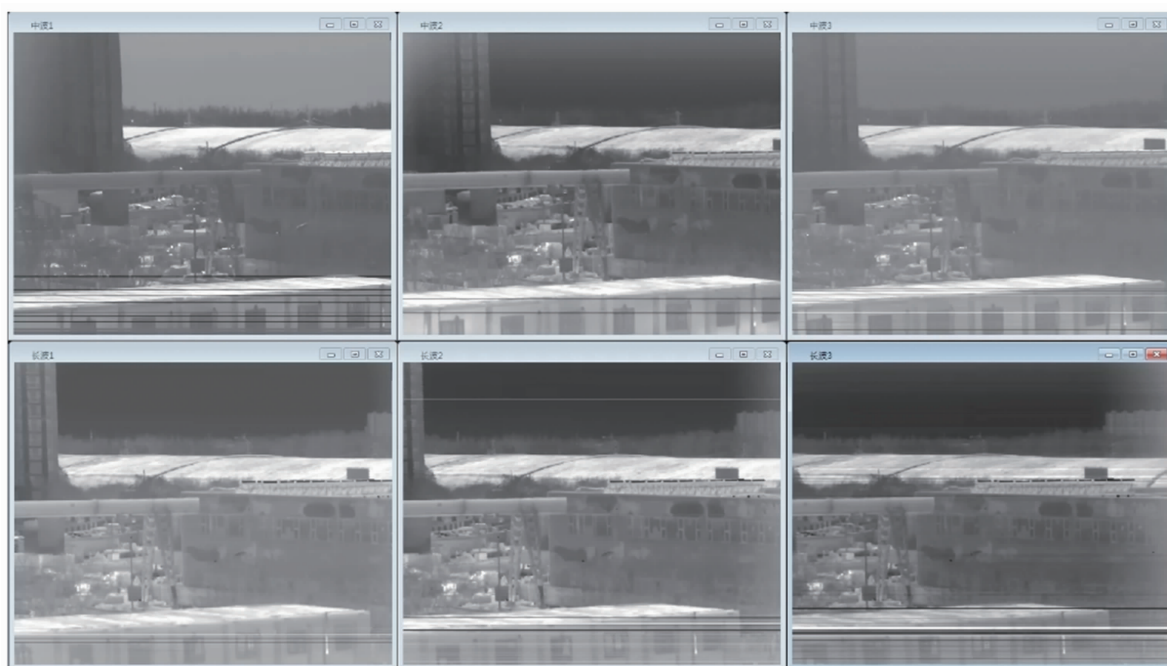


图 9 多谱段 TDI 线列制冷红外探测器组件的成像图

图 8 是探测器的 6 个波段的相对响应光谱图。通过点目标实验室验证, 6 个波段在面对其响应波段内的目标时, 信噪比高, 对比度优异。图 9 是探测器的演示成像图片, 只进行了

简单的单点校正。从中可以看到中长波成像的不同细节, 后端通过算法可以发现其更多光谱信息, 而且通过多波段探测, 降低了目标虚警率。

4 结束语

我们研制的 $1024 \times 4 \times 6 @ 20 \mu\text{m}$ 多谱段红外探测器组件具有 NETD 小、行频高、串扰小、均匀性高、体型小、功耗低、响应波段宽、集成度高、启动时间短等优点, 实现了 6 个不同波段同时探测目标的能力。该组件可用于星载和机载系统, 为地球的资源探测、军事气象监测、环境监测以及灾害预警提供有力支持。目前产能稳定, 可实现批量生产。未来将探测器波段扩展为短/中波、短/中/长波以及长/长波波段, 并可通过拼接方式实现 $8192 \times 4 \times 6$ 阵列规格, 有效提升国内高性能多波段焦平面探测器的开发水平。

参考文献

- [1] 王成刚, 东海杰, 刘泽巍, 等. “高分五号”卫星多谱段集成 TDI 线列红外探测器 [J]. 航天返回与遥感, 2018, **39**(3): 5.
- [2] 刘康, 周壮, 李盛阳, 等. 天宫一号高光谱遥感场景分类数据集及应用 [J]. 遥感学报, 2020, **24**(9): 11.
- [3] 姜高珍, 韩冰, 高应波, 等. Landsat 系列卫星对地观测 40 年回顾及 LDCM 前瞻 [J]. 遥感学报, 2013, **17**(5): 16.
- [4] 乔辉. 航天 HgCdTe 红外探测器工艺及暗电流研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [5] Hansen G L, Schmit J L. Calculation of Intrinsic Carrier Concentration in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(3): 1639–1640.
- [6] 中国科学院上海技术物理研究所. 红外焦平面阵列参数测试方法: GB/T 17444–2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.