

超长线列双波段红外焦平面探测器杜瓦封装技术研究

李俊^{1,2,3}, 王小坤^{1,2}, 孙闻^{1,2}, 林加木², 曾智江^{1,2,3}, 沈一璋^{1,2}, 范广宇^{1,2}, 丁瑞军^{1,2}, 龚海梅^{1,2}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对拼接型短/中波的超长线列焦平面探测器与直线脉管集成耦合的要求, 分析了超长线列焦平面杜瓦封装的难点。通过对超长冷平台的温度均匀性、超长冷平台支撑结构、大体积组件杜瓦低热负载、超长线列杜瓦真空寿命等封装技术进行研究, 提出了多点“S”型冷链结合导热层的三维热输出方法, 设计了“桥式”两基板的超长冷平台支撑结构, 解决了超长冷平台高温均匀性、集成探测器后低应力及焦深控制、超长线列探测器杜瓦组件的环境适应性、低热负载和长真空寿命等关键技术, 成功研制超长线列双波段焦平面探测器制冷组件, 并通过一系列空间环境适应性试验验证, 试验前后组件性能未发生明显变化, 满足工程化应用的要求。

关键词: 超长线列红外探测器; 双波段; 杜瓦封装

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1104003

Study on Dewar package for dual-band long linear IRFPA detectors

Li Jun^{1,2,3}, Wang Xiaokun^{1,2}, Sun Wen^{1,2}, Lin Jiamu², Zeng Zhijiang^{1,2,3}, Shen Yizhang^{1,2},
Fan Guangyu^{1,2}, Ding Ruijun^{1,2}, Gong Haimei^{1,2}

- (1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the requirement of the butting short and middle waves long linear IRFPA detectors integrating and coupling with the inline pulse tube cryocooler, the difficulties of the Dewar package were discussed. By studying the temperature uniformity and the supporting structure of long butting substrate, the cold loss and the vacuum life of the large-size Dewar, the three-dimensional thermal output method of the multi-point "S" type thermink combined with the conductive layer was proposed, and the supporting structure of "bridge" with the dual substrate was designed, which were to solve the key technologies of higher temperature uniformity of the long butting substrate, the lower

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61475179); 中国科学院青年创新促进会基金(2014215)

作者简介: 李俊(1984-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事红外探测器封装与集成技术研究。Email: cfdlijun@126.com

导师简介: 龚海梅(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事航天遥感用红外光电探测器的应用基础研究和基础研究。

Email: hmgong@mail.sitp.ac.cn

thermal stress of the integrated detector and depth of focus control, space environmental adaptability, lower cold loss and longer vacuum life, the Dewar assembly for the dual-band long linear FPA had been successfully developed, and tested by serial space environment adaptability tests, the results show that those main performances do not change obviously. The Dewar assembly satisfies the requirements of the space application.

Key words: long linear IRFPA detectors; dual-band; Dewar packaging

0 引言

随着对空间分辨率及探测器灵敏度等要求的提高, 航天红外焦平面探测器的规模朝向超长线列发展^[1]。考虑探测器的成品率与研制成本, 超长线列红外焦平面探测器常采用几十个线列模块的拼接方式提高分辨率以及采用 TDI 方式提高图像的信噪比, 目前红外焦平面超长线列拼接像元已超过 15 000 元, 模块的数量已达到 20 个, 超长线列拼接的长度已达到 200~300 mm^[2-3]。这些 TDI 器件焦耳热以及超大容积杜瓦热负载对制冷机的冷量提出了更高的要求。基于直线脉管制冷效率高、无运动部件、可靠性高等优点, 航天超长线列红外焦平面组件采用探测器与直线脉管集成耦合^[4], 该耦合方式对杜瓦低热负载、超大尺寸冷平台温度均匀性、超长线列焦平面空间应用环境适应性及高可靠性等封装技术提出了新的挑战。

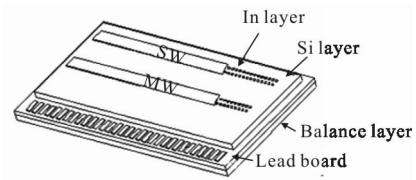
目前, 国外 NOAA GEO-1 项目研制的陆地成像仪由 14 个多光谱探测器模块线列拼接形成超长线列探测器, 其拼接精度可达到 6 μm^[1]; NASA EO-1/ALI 项目研制的多光谱探测器组件将四片硅探测器与碲镉汞探测器拼接成一个子模块, 再将五个子模块精密拼接形成超长线列探测器组件^[5]。国内华北光电技术研究所介绍了 5 000×6 元长波组件探测器精密拼接工艺实现方法^[3]; 中国科学院上海技术物理研究所对应用于 7 000 元长线列短波组件的上部为刚性、下部局部为“S”型的弹性冷链进行优化设计, 对温度均匀性、低温形变进行测试^[4]; 文献报道主要集中在对探测器拼接状态及探测器组件性能的阐述。文中分析了超长线列双波段焦平面封装的特点, 系统阐述了超长拼接基板温度均匀性、超长线列探测器杜瓦组件的环境适应性、低热负载和长

真空寿命等关键技术的解决途径和结果, 成功研制出超长线列双波段焦平面探测器杜瓦组件, 对我国航天红外遥感仪器的发展有一定的促进作用。

1 超长线列双波段焦平面杜瓦封装特点

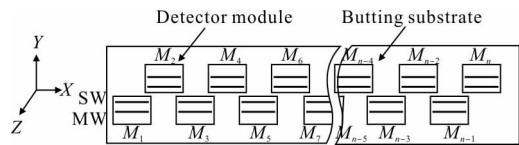
1.1 器件及拼接基板

超长线列焦平面探测器可由 16 个以上直接倒焊的、集成短/中波的 512 通道输出的线列碲镉汞焦平面子模块“品”字型精密交错拼接形成^[6], 在长线列方向奇偶子模块间旋转对称, 探测器双波段模块及线列拼接分布如图 1 所示。拼接基板是由热膨胀系数与子模块宝石基板比较接近的可伐材料加工而成, 它既作为子探测器模块的共同基板, 同时又是滤光片支架及柔性冷链安装、封装基准传递等各部分的综合部件, 对超长线列器件的组装精度及封装质量有关键的影响。超长线列器件拼接后子模块间的 X、Y 方向误差约 ±5 μm, 在焦深 Z 方向的高度差小于 ±10 μm。



(a) 双波段模块示意图

(a) Schematic diagram of dual-band module



(b) 超长线列拼接示意图

(b) Layout of the butting manner of long linear IRFPA

图 1 超长线列探测器示意图

Fig.1 Schematic diagram of long linear IRFPA detectors

1.2 超长线列杜瓦

超长线列杜瓦是超长线列红外探测器的保护装置,为其提供低温真空环境,同时实现探测器与外界的光、电和热交换。如图 2 所示,在杜瓦冷平台上安装拼接式超长线列探测器、滤光片支架、滤光片、冷屏、低温辐射屏等。为了提高超长线列探测器的信噪比,在线列探测器上方安装了同时含短波和中波滤光片的滤光片支架及冷屏结构。该结构的内表面均进行了消杂光处理。在滤光片支架及冷屏外侧通过安装低温防辐射屏以有效降低辐射热。由于探测器规模较大、冷平台的负载较重,杜瓦冷平台的力学支撑多设计为桥式两点支撑结构。两点支撑多为高强度、低热导率的薄壁结构,以满足冷平台的力学要求及较低热传导漏热。利用多点柔性冷链实现制冷机单点冷源与超长线列冷平台的冷量传输。拼接式超长线列探测器由 16 个以上双波段 512 通道输出线列碲镉汞焦平面子模块组成,共有 700 多根引线实现探测器与真空杜瓦外的信息交换。杜瓦封装需要在兼容电磁和探测器性能的前提下,降低由于探测器信息交换给制冷机冷量带来的负载。超长线列杜瓦封装需要解决拼接式超长线列红外探测器高拼接精度、超长尺寸拼接基板的温度均匀性和力学支撑刚度、超长尺寸冷平台与冷指耦合的低冷缩应力等问题。

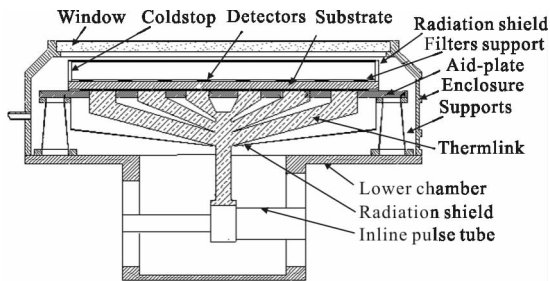


图 2 超长线列杜瓦结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of Dewar for long linear IRFPA

1.2.1 超长冷平台支撑结构

超长线列冷平台的支撑结构如图 3 所示,为桥式两点支撑的简支梁结构,两端采用侧壁镂孔的圆锥截面支撑柱,桥面为拼接基板与钛合金辅助基板的两基板螺接复合结构,以确保超长线列红外探测器在低温下只承受一维约束,避免了桥式支撑结构在力学振动时附加应力及封装结构热应力对探测器性能的影响;航天红外成像系统对探测器在振动环

境下像元的相对位移要求不超过 1/3 像元^[2],因此,通过对圆锥截面支撑柱圆锥角 θ 和壁厚 W_i 进行优化设计,以满足冷平台当受到 $X、Y$ 方向静力载荷及振动作用后,具有较小的扰度和倾斜角的变化量,保证探测器始终位于光学系统焦面的允许误差范围内,也能保证杜瓦冷平台各部分(如拼接基板与支撑螺接结构、引线互连等)的可靠性^[7-9];同时要求支撑具有较低的固体传导漏热。

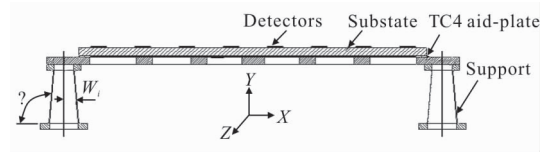


图 3 超长线列杜瓦冷平台支撑结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of supporting structure of Dewar substrate for long linear IRFPA

当钛合金支撑圆锥角 $\theta=95^\circ$ 时,选取不同侧壁厚为 W_i 的支撑结构,按表 1 所示的正弦振动试验条件进行强迫振动的有限元仿真,将两个支撑的底部进行固定约束,以验证拼接基板端面与中间模块的响应特性,分析结果如表 2 所示。拼接基板与钛合金辅助基板虽然通过绝热垫圈实现螺接,但是在 5~25 Hz 时中间与两侧模块响应并未发生明显放大,在 25~200 Hz 时 $X、Y$ 方向的振动对基板上模块振动响应较为明显, Y 方向的放大倍数最大值为 1.45 倍;对选用不同支撑壁厚 W_i 的杜瓦进行液氮测试,并通过热差分法获得了三种壁厚的圆锥支撑的固体传导漏热,其结果表明随着壁厚的增加,支撑的固体传导漏热也在大幅增加,对杜瓦总热负载也有着重要影响。

表 1 正弦振动试验条件

Tab.1 Condition of the sine vibration test

| Condition | Direction | Frequency/Hz | Amplitude/g |
|----------------|-----------|--------------|-------------|
| Sine vibration | X, Z | 10-25 | 7 |
| | | 25-200 | 8 |
| | Y | 10-25 | 10 |
| | | 25-200 | 11 |

综合考虑圆锥支撑刚度、机加工难易程度及固体传导漏热等因素,最终选用侧壁厚度 $W_i=0.3$ mm 且表面带镂孔的钛合金圆锥支撑作为力学支撑。正弦振动主要考核结构特性,其频率范围一般为 1~200 Hz。

表 2 不同支撑结构时基板上模块响应放大倍数及支撑固体传导漏热

Tab.2 Amplification times of modules on the substrate and conductive loss of the supports under different supporting structures

| W _i /mm | Frequency/Hz | Module number | Dir | X | | Y | | Z | | Q _{con,loss} /W |
|--------------------|--------------|---------------|----------------------|--------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------------------------|
| | | | | Frequency range/Hz | 10-25 | 25-200 | 10-25 | 25-200 | 10-25 | |
| 0.2 | 365.78 | M1 | Amplification factor | 1 | 1.33 | 1 | 1.45 | 1 | 1.01 | 0.3 |
| | | M7 | | 1 | 1.32 | 1 | 1.45 | 1 | 1.02 | |
| 0.3 | 384.2 | M1 | Amplification factor | 1 | 1.22 | 1 | 1.38 | 1 | 1.01 | 0.59 |
| | | M7 | | 1 | 1.22 | 1 | 1.38 | 1 | 1.01 | |
| 0.4 | 466 | M1 | Amplification factor | 1 | 1.15 | 1 | 1.23 | 1 | 1.01 | 0.88 |
| | | M7 | | 1 | 1.15 | 1 | 1.24 | 1 | 1.02 | |

本节研究是主要解决探测器所处位置相对于杜瓦安装的力学振动放大倍数的问题。在组件研制时,为了验证组件杜瓦的多阶模态准确性和工艺一致性,进行了随机考核。其频率范围为 1~2 000 Hz,鉴定级量级为 7.17 grms。对该杜瓦制冷组件进行经鉴定级正弦振动及随机振动试验,试验后引线完好,探测器性能正常,制冷机降温时间及制冷性能未发生明显变化。

1.2.2 超长冷平台温度均匀性及探测器低温可靠性设计

为了解决超长线列探测器装载面温度场均匀性,实现 16 个以上探测器均匀致冷的目的,同时为减少热交换界面,采用多点冷链与超长线列器件拼接基板直接热接触的热耦合技术,为了使杜瓦质量较轻、内部结构较为紧凑及降低冷平台及冷链与外壳壁面之间的辐射漏热,设计了一种上部为多层“S”型薄片(每层厚度在 0.25~0.4 mm 之间)、下部为刚性圆柱体的“树状”低温柔性冷链结构,在钛合金辅助基板下方可以安装低温防辐射屏以降低柔性冷链与下腔体壁面间的辐射漏热。如图 5 所示,通过 6 点

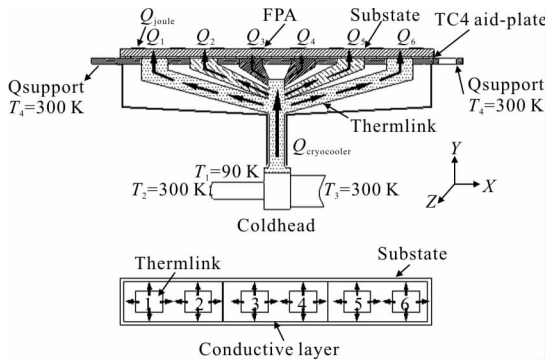


图 5 超长线列杜瓦冷量传递示意图

Fig.5 Cold transferring of Dewar for long linear IRFPA

柔性冷链与低温导热层相结合的方案将单点冷源冷量均匀引到超大冷平台上^[9],实现了单点冷源与多点的冷量传输,导热层将冷量传输到多点后实现装载面上的二次温度均匀性。

文中采用液氮制冷的方式对超长线列杜瓦拼接基板进行温度场测试。达到热平衡时,杜瓦真空度为 1.2×10⁻⁵ Pa,基板的温度均匀性分布如图 6 所示。直线脉管冷头与拼接基板之间的温差为 3 K,拼接基板模块胶接面的温度为 80.5±0.5 K,实现了超大冷平台较高的温度均匀性,杜瓦热负载采用质量流量计方法测试约为 3.1 W,通过获得液氮的冷损修正热传导及热辐射计算公式,计算可得冷平台 95 K 时杜瓦热负载约为 2.82 W。

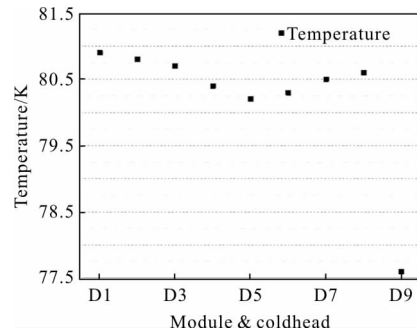
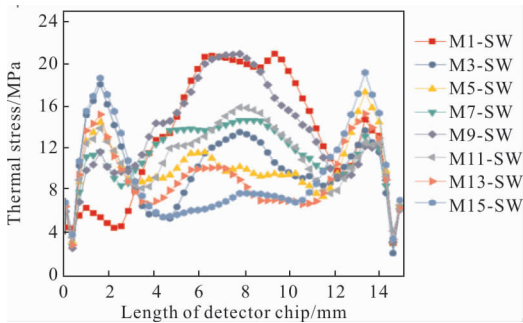


图 6 超长线列杜瓦冷平台温度场分布

Fig.6 Temperature distribution of Dewar substrate for long linear IRFPA

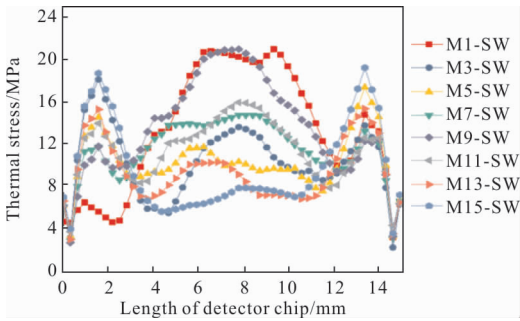
通过“树状”低温柔性冷链的上端多片“S”型铜质薄片结构提供一定的柔性,以消除冷源与超长线列红外探测器连接后在降温过程中的热应力。对液氮制冷工况时探测器模块所受的热应力进行仿真,分析材料参数及设置方法参见参考文献 [9-10],分

析结果如图 7 所示。探测器中、短波芯片外延层在 80 K 低温工作时所承受的冷缩最大应力为 21.2 MPa, 杜瓦组件经多次液氮测试及制冷机开关机测试表明该结构对探测器性能无影响。



(a) 中波探测器热应力

(a) Thermal stress of MW detectors



(b) 短波探测器热应力

(b) Thermal stress of SW detectors

图 7 探测器模块热应力仿真数据图

Fig.7 Simulated data of thermal stress of the modules

16 个以上双波段红外探测器按一定的光学要求“品”字型交错拼接在具有一定厚度的可伐基板上, 再将该基板螺接安装在具有框架结构的辅助基板的“桥”面上, 最后将双层复合基板通过两端的圆锥截面支撑柱安装在杜瓦的安装基准上。该安装结构解决了由于自身重力、外力及低温下 16 个以上红外探测器的共面的难题。16 个模块的共面度在低温 95 K 下测试时均优于 10 μm , 与常温封装时的状态相比较未见明显变化。由低温冷缩导致的探测器焦面与杜瓦安装机械基础之间的 Z 向离焦量试验测定为 20 μm , 最终可通过组件杜瓦内的桥式支撑的 Z 向高精度修配克服。通过上述两种技术有效地解决了探测器工程应用时焦深控制的问题。

1.2.3 内引线电互联设计

超长线列双波段红外焦平面探测器由 16 个以

上 512 通道输出的线列探测器模块拼接而成, 每个子模块有 45 根引出线, 所有模块全部引出将有 700 根以上的引线。引线方案设计时充分考虑低漏热、可靠性和电磁兼容性, 采用 6 片陶瓷引线基板在低温下拼接组装后通过低漏热引线引出。陶瓷引线基板之间通过引线键合实现电互联。拼接组装后的陶瓷引线基板设计原则: (1) 探测器的模拟信号和数据信号物理隔离; (2) 探测器的电源和地线要求防降压设计; (3) 布局布线, 加大相邻通道间距设计, 以降低各通道之间的干扰; (4) 子模块电路引出端中同功能引线合并; (5) 子模块电路引出端可以合并的引线合并; (6) 子模块电路引出端有些不出。设计充分考虑了引线电学及热学的可靠性, 将探测器引线最终分为两组, 外引线数量降到 122 根, 每组 61 根。

1.2.4 集成式杜瓦真空寿命

超长线列杜瓦内零部件及材料种类较多, 同时集成耦合了内充 3 MPa 高压氢气的直线脉管冷指在杜瓦下部真空腔内, 而且零部件之间的焊缝种类及数量较多、材料解析放气源多及直线脉管 0.2~0.3 mm 薄壁管高压氢渗透等均可能对超长线列杜瓦真空寿命具有较大影响, 在地面应用时需满足两年真空寿命的要求。超长线列杜瓦内放气源既有非金属材料出气, 也有金属材料释放氢气。由于该杜瓦经过了数十天真空排气烘烤, 放气源主要为氢气。该组件采用直线脉管与红外探测器直接耦合, 存在制冷机脉管中的高压氢气通过脉管金属壁渗透进入杜瓦真空腔内, 需要研究氢气对脉管薄壁金属壳的渗透。采用杜瓦材料解析放气速率及渗透速率模型对该杜瓦的真空寿命进行了估算, 计算结果表明, 在两年时真空度为 6.42×10^{-3} Pa。设计了一种在杜瓦排气口位置

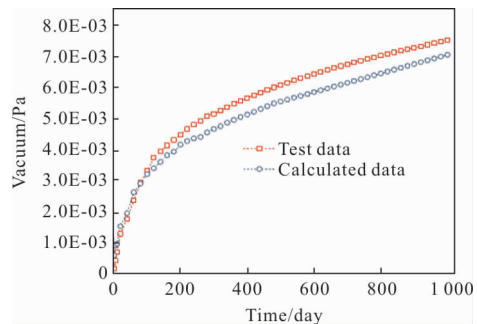


图 8 超长线列杜瓦真空寿命计算及测试曲线

Fig.8 Calculated and tested curves of Dewar vacuum life for long linear IRFPA

安装外置复合微型真空规在线监测方法,对样品编号为 201502 的杜瓦制冷组件的真空度进行了长期监测,并通过制冷性能试验验证了计算结果的合理性。监测结果表明杜瓦真空度在两年内可以达到 6.9×10^{-3} Pa, 低于 1×10^{-2} Pa(此真空时对流传热对杜瓦热负载具有较大影响)的要求^[11],对该杜瓦制冷组件进行开机制冷,当探测器工作温度为 95 K 时,该杜瓦从排气台夹封后制冷机开机功耗为 50 W,两年后制冷机开机的功耗为 50.9 W,说明杜瓦内部真空度两年内未见明显变化,可以认为杜瓦的真空未失效。

2 产品及主要性能指标

通过上述关键技术的突破,成功获得了性能良好的超长线列(拼接规模大于 8 000 元)双波段红外焦平面杜瓦组件,其主要性能指标见表 3,超长线列杜瓦组件如图 9 所示。按照《红外焦平面探测器制冷组件通用规范》的环境试验要求完成了鉴定级正弦振动、随机振动、机械冲击及加速度等力学环境试

表 3 主要性能指标

Tab.3 Main performance indexes

| Item | Value | Item | Value |
|--------------------------|-------|------------------|--------------------------|
| Temperature/K | 95 | Adapter cooler | Linear pulse tube cooler |
| Temperature difference/K | ±0.5 | Heat load/W | 2.82 |
| Wave band/μm | 1-5 | Packaging | Dewar (Vacuum) |
| Pixel size/μm | 28×28 | Assembly mass/kg | 7.9 |
| Pixel centre distance/μm | 28 | Vacuum life/year | 2 |
| F# | 2 | | |

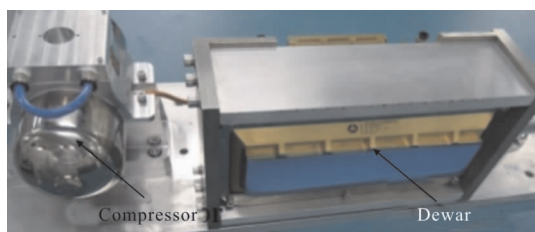


图 9 超长线列杜瓦组件实物图

Fig.9 Picture of Dewar assembly for long linear IRFPA

验,完成了高、低温存储及高低温冲击等热学试验,试验结果表明探测器性能工作正常,杜瓦制冷组件性能正常。

3 结论

超长线列双波段红外焦平面在空间大视场及高分辨率航天应用中具有较大优势,其工程应用具有重要意义。文中着重解决了拼接式超长线列红外探测器拼接精度、超长尺寸冷平台的温度均匀性和力学支撑刚度、超长尺寸冷平台与直线脉管冷指耦合的低冷缩应力等问题,并进行了地面力学、热学的环境适应性验证,满足工程化应用要求。

参考文献:

- [1] Wang Chenggang, Dong Haijie. Butted manner analysis of long linear infrared focal plane detectors of MCT[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 920-923. (in Chinese)
王成刚, 东海杰. 超长线列碲镉汞红外探测器拼接方式对比分析[J]. *激光与红外*, 2013, 43(8): 920-923.
- [2] Chen Boliang, Li Xiangyang. Infrared Imaging Detectors For Space Applications [M]. Beijing: Science Press, 2016: 74-75. (in Chinese)
陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 74-75.
- [3] Xie Heng, Dong Haijie, Zhang Yi. Research on butting technology of long-wave infrared linear HgCdTe FPA [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(1): 58-61. (in Chinese)
谢珩, 东海杰, 张懿. 长波长线列碲镉汞焦平面器件拼接工艺研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(1): 58-61.
- [4] Fan Guangyu, Fan Cui, Li Jun, et al. Cold strap design of long linear IRFPA Dewar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2021-2026. (in Chinese)
范广宇, 范崔, 李俊, 等. 超长线列红外焦平面杜瓦冷链设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2021-2026.
- [5] Kirk A Lindahl, William Burmestera, Kevin Malone, et al. Summary of the operational land imager focal plane array for the landsat data continuity mission[C]// SPIE, 2011, 8155: 81550Y.
- [6] Han Bing, Chen Xin, Rao Peng, et al. Applications of ASIC in the long array column of infrared TDI detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (6): 1733-1738. (in Chinese)
韩冰, 陈忻, 饶鹏, 等. ASIC 技术在长线列 TDI 红外探

- 测器中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1733-1738.
- [7] Wang Xiaokun, Zeng Zhijiang, Zhu Sangen, et al. Dewar for medium wave 2048 pixel long linear HgCdTe IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 611-614. (in Chinese)
王小坤, 曾智江, 朱三根, 等. 中波 2048 元长线列碲镉汞焦平面杜瓦组件[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 611-614.
- [8] Brenière X, Tribolet P. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance[C]//SPIE, 2008, 6940: 69400H.
- [9] Xia Chenxi, Li Jun, Sun Wen, et al. Research on evaluation method of radiant heat of long linear IRFPA Dewar[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(9): 794-797. (in Chinese)
夏晨希, 李俊, 孙闻, 等. 超长线列红外探测器杜瓦组件辐射热评估方法研究[J]. 红外技术, 2017, 39(9): 794-797.
- [10] Chen Xing, He Kai, Wang Jianxin, et al. Thermal cycling reliability of linear HgCdTe infrared detectors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(4): 369-374. (in Chinese)
陈星, 何凯, 王建新, 等. 碲镉汞线列红外探测器模块温度循环的可靠性[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(4): 369-374.
- [11] Li Jianlin, Liu Xiangyun, Zhu Yingfeng, et al. IRFPA Dewar device vacuum failure and its test method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2874-2879. (in Chinese)
李建林, 刘湘云, 朱颖峰, 等. 红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效及其检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2874-2879.