

## 集成冷光学的双波段杜瓦组件技术

曾智江<sup>1,2,3</sup>, 杨力怡<sup>1,2</sup>, 郝振贻<sup>1,2</sup>, 徐琳<sup>1,2</sup>, 范广宇<sup>1,2</sup>, 范崔<sup>1,2,3</sup>, 李俊<sup>1,2</sup>, 李雪<sup>1,2</sup>, 龚海梅<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>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;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100039

**摘要** 集成冷光学的红外探测器杜瓦封装在中波、长波红外组件研制中具有重要意义,有利于抑制红外辐射背景、提升仪器灵敏度和集成度。提出了集成冷光学的中波、长波双波段探测器杜瓦组件,设计了一体化冷平台支撑、低漏热透镜支撑等新结构,解决了冷光学透镜组与探测器组合、双波段探测器透镜组之间高精度配准及高强度单点支撑钎焊等新工艺,建立了该冷光学集成组件杜瓦的冷面温度均匀性、双温区控制以及低热负载等关键参数。实现了杜瓦液氮热负载小于 0.85 W,中波工作于 73 K,冷面温度均匀性 0.36 K,长波工作于 65 K,冷面温度均匀性 0.08 K,探测器与透镜组配准精度偏差优于  $\pm 10 \mu\text{m}$ ,探测器光学模组间配准偏差优于  $\pm 15 \mu\text{m}$ 。该新型杜瓦已通过一系列空间环境适应性试验验证,成功应用于风云四号系列气象卫星大气垂直探测仪中。

**关键词** 光学设计; 双波段红外探测器; 杜瓦集成封装; 冷光学; 低温透镜组; 高精度配准

中图分类号 TN215

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221320

## 1 引言

对于大视场红外(IR)光学系统,为了突破光学系统后焦距大于杜瓦窗口和探测器之间距离的制约,必须增加一个辅助光学组,这增加了光机系统的复杂性<sup>[1]</sup>,而把透镜尽可能地靠近红外探测器光敏面则可以极大降低红外相机光机系统的复杂性<sup>[2-3]</sup>。

美国 GOES-R 卫星的先进垂直探测仪[ABS,后来改名为高光谱环境探测仪(HES)]<sup>[4]</sup>是国外干涉式探测仪的代表。其内部有短波(SW)、中波(MW)和长波(LW)的红外探测器,规格为  $48 \times 22$  元,探测器光敏元大小为  $58 \mu\text{m}$ ,截止波长分别为 4.7、8.5、15.1  $\mu\text{m}$ 。探测器工作温度均为 65 K,采用柔性冷链进行冷量传输的冷箱设计实现短波、中波、长波探测器的集成封装。冷箱及冷光学的工作温度 200 K。配双脉管制冷机,60 K 温度下制冷量 2.5 W。

美国地球同步成像傅里叶变换光谱仪(GIFTS)主要通过两个红外波段(长波红外  $685 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$  和中波红外  $1650 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$ )进行辐射探测,因为其采用了  $128 \times 128$  元的红外面阵成像器件,在地面分辨率为 4 km 时,可以达到  $0.6 \text{ cm}^{-1}$  的高光谱分辨率。且垂直分辨率可以控制在 3~11 km 的范围内<sup>[5]</sup>。

中国风云四号(FY4)干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)是国际上第一台在静止轨道上以红外干涉分

光方式探测三维大气垂直结构的精密遥感仪器。它实现了  $4.44 \sim 14.6 \mu\text{m}$  波段的红外傅里叶变换光谱测量<sup>[6]</sup>,光谱分辨率为  $0.625 \text{ cm}^{-1}$ ,瞬时视场为  $7.9^\circ$ ,探测器整个视场角(FOV)为  $108^\circ \times 108^\circ$ 。由于仪器视场角大, $F$  数接近 1,必须在靠近探测器位置封装部分冷光学透镜,否则整个光机系统会非常庞杂。此外,对于弱信号及多光谱探测,必须降低背景噪声,而冷光学在红外组件内的集成将显著抑制红外辐射背景、提升灵敏度和集成度,对于红外组件的应用具有重要意义。本文提出了集成冷光学的中波、长波双波段的杜瓦组件设计,全面阐述了单个光敏面为  $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$  的  $32 \times 4$  元规格阵列<sup>[7]</sup>探测器与双透镜组的微米级耦合配准封装,分析其冷面温度均匀性、双温区控制以及低热负载等关键参数,有利于推动高性能红外组件集成关键技术的发展。

## 2 集成冷光学双波段杜瓦总体设计

双波段冷光学集成杜瓦是双波段红外探测器工作的必要保护屏障和光电性能传输的有效装置,为其提供真空、低温环境,同时实现探测器与整机光学系统的后光路集成成像。在杜瓦冷平台上安装焦平面阵列(FPA)探测器、多元探测器、透镜组、透镜支撑、滤光片、冷光阑等。由于探测器光学模组较为复杂、冷平台的负载较重,杜瓦冷平台的力学支撑采用高强度单点

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2022-11-17; 录用日期: 2022-12-16; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(11427901)

通信作者: \*hmgong@mail.sitp.ac.cn

冷指结构。冷指为高强度、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要求。利用中波隔热环实现制冷机单点冷源与冷平台的有效冷量传输。杜瓦组件冷光学部分由 4 只透镜、2 片滤光片和 2 个碲镉汞探测器模块组成,杜瓦内光学布局如图 1 所示<sup>[8]</sup>,虚线框内的部分为杜瓦内光学要求。杜瓦内还有 160 多根引线实现探测器与真空杜瓦外的电学引出,因而

杜瓦封装在考虑电磁兼容和充分发挥探测器性能的前提下,需尽量降低探测器工作时组件的热负载,即杜瓦具有较低的冷损值,并需减小制冷机冷头与探测器之间的耦合温差。冷光学杜瓦封装还需要解决探测器和透镜组内轴向高精度配准、探测器光学模组间高精度配准、大尺寸冷平台与探测器耦合的热应力等问题。

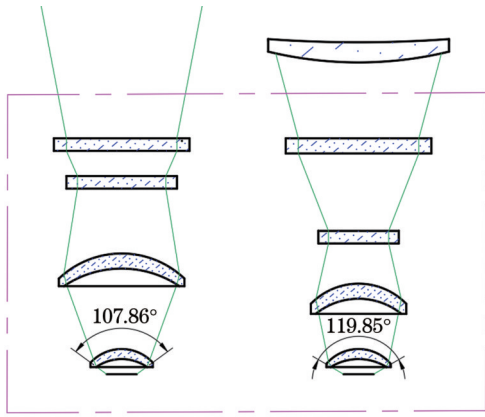


图 1 杜瓦内冷光学布局示意图

Fig. 1 Optical layout of FOV optics in Dewar

图 1 中组件内还包含两个 32×4 元阵规格的中长波探测器,光敏元大小均为 120 μm×120 μm。中波红外(MWIR)探测器为碲镉汞光伏焦平面探测器,响应波段为 4.44~6.06 μm;长波红外(LWIR)探测器为碲镉汞多元光导探测器,响应波段为 8.83~14.3 μm。每个探测器在光轴方向集成了 1 片滤光片、2 只透镜和 1 只冷光阑,每个探测器与光学元件配准形成探测器光学模组,然后二者再在冷平台上进行配准安装。组件设计的特点是高强度单支撑冷指结构、单点冷源共面温差式双波段集成设计、透镜自对准辅助固定压环设计等,具体封装结构见图 2。探测器与透镜组配准精度偏差小于±10 μm,探测器光学模组间配准偏差小于±15 μm。

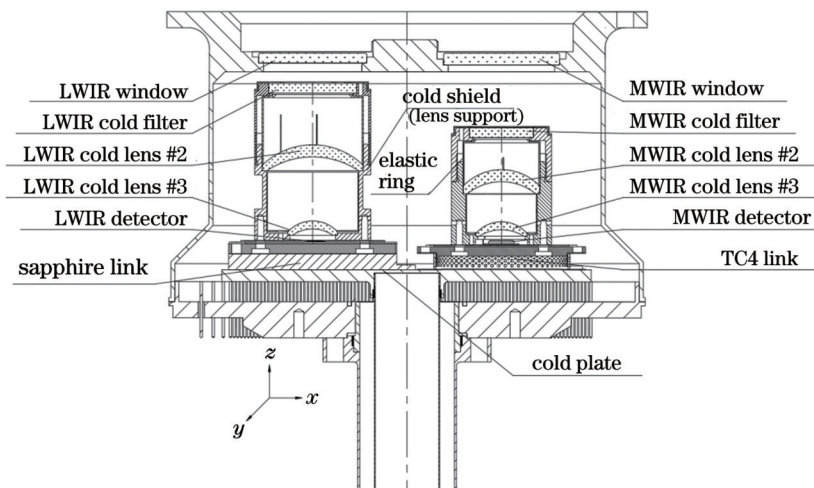


图 2 双探测器透镜组封装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Dewar packaging with two detectors and corresponding lens groups

### 2.1 一体化冷平台支撑新结构

对杜瓦冷指的负载、质量及其最大加速度承受载荷进行了力学分析。薄壁冷指的质量约 4.22 g,红外探测器杜瓦冷指的顶端负载及其质量为 360.5 g。

冷指简化后的力学模型为悬臂梁结构,如图 3 所示。考虑相应空间应用的力学条件,最大载荷为 500 m/s<sup>2</sup>时,其受力情况如下:载荷  $F_1$  为冷指的自重,载荷  $F_2$  为顶端背压受力。下面进行抗拉压和弯曲力学分析。

(1) 抗拉压力学分析。应力公式为

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{S} < [\sigma], \quad (1)$$

式中: $F_{\max}$  为最大受力,  $F_{\max} = F_1 + F_2 = (4.22 + 360.5) \times (500 + 9.8) = 186.00 \text{ N}$ ;  $S$  为冷指截面积,计算式为

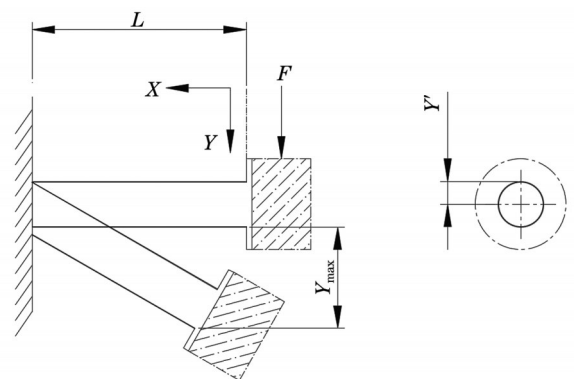


图 3 杜瓦冷指力学简化模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mechanical model of cold finger in Dewar

$$S = \pi \frac{D^2 - d^2}{4}, \quad (2)$$

式中:  $D$  为圆环外径,  $D = 16.3 \text{ mm}$ ;  $d$  为内径,  $d = 15.9 \text{ mm}$ 。

于是有  $S = 1.01 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。再代入式(1)求出  $\sigma = 186 / (1.01 \times 10^{-5}) = 18.4 \text{ MPa}$ 。

(2) 抗弯力学。根据悬臂梁的挠度计算公式可知, 自由端(冷指头部)的挠度最大, 且满足

$$Y_{\max} = \frac{FL^3}{3EI}, \quad (3)$$

式中:  $F$  为冷指顶端集中载荷, 根据模型受力近似为  $F_{\max}$ , 即  $186 \text{ N}$ ;  $L$  为冷指的设计长度, 取值  $77.3 \text{ mm}$ ;  $E$  为 TC4 的弹性模量, 取值  $104.8 \text{ GPa}$ ;  $I$  为圆环形冷指截面对形心轴的二次矩, 计算公式为

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4). \quad (4)$$

将  $D$  和  $d$  的值代入式(4)得  $I = 3.28 \times 10^{-10} \text{ m}^4$ ; 再将各个参数值代入挠度计算公式[式(3)], 可求出冷指头部的最大挠度为  $Y_{\max} = 8.34 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。根据简单弯曲理论, 可知固定端(冷指根部)的应力最大, 且满足

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} Y', \quad (5)$$

式中:  $M_{\max}$  为根部的弯矩, 取值  $M_{\max} = W \cdot L = 186 \times 77.3 \times 10^{-3} = 14.38 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;  $Y'$  为冷指根部外径距其中心轴的距离, 即  $8.05 \text{ mm}$ 。

计算出冷指根部的最大应力为  $352.9 \text{ MPa}$ 。TC4 的许用应力  $[\sigma] = \sigma_{0.2} / n_s$ , 其中  $\sigma_{0.2}$  为屈服强度,  $n_s$  为安全系数。根据相关文献可知 TC4 钛合金的屈服强度  $\sigma_{0.2} = 825 \text{ MPa}$ <sup>[9]</sup>, 安全系数  $n_s$  取 1.5, 则许用应力  $[\sigma] = 550 \text{ MPa}$ , 若杜瓦承受的最大加速度载荷为  $500 \text{ m/s}^2$ , 则其许用应力仍有很大的余量。冷指材料若采用 304L 不锈钢, 其屈服强度  $\sigma_{0.2}$  为  $310 \text{ MPa}$ <sup>[9]</sup>, 安全系数  $n_s$  取 1.5, 则许用应力  $[\sigma] = 206.7 \text{ MPa}$ , 强度不足, 且冷指经过多次高低温循环后强度可能变低, 容易在力学振动时产生变形。考虑到探测器  $65 \text{ K}$  工作温度的冷指冷端与常温端之间的传热需尽量小, 结合前述的支撑刚度、机加工难易程度及零部件高温钎焊等因素, 最终选用圆柱壁厚  $0.2 \text{ mm}$  的钛合金冷指作为单力学支撑, 可以满足低漏热、高强度的设计要求。

## 2.2 低漏热冷光学支撑新结构

设计中需要解决探测器与透镜组、滤光片间的  $Z$  轴向传热和探测器面阵温度场均匀性问题, 既要实现制冷机至长波探测器的低热阻传热, 又要适当提高中波探测器及其光学模组的工作温度, 实现温差式控温的低漏热设计目的。同时需要尽可能减轻杜瓦质量, 特别是杜瓦内冷平台上负载质量, 使得内部结构紧凑、热传输通道尽量短且高效。为此设计了以冷平台为中长波探测器及光学模组的配准共用基准、蓝宝石为长波探测器冷链、钛合金隔热圈为中波探测器冷链的结构。在各界面间采用钢片/无氧铜片作为界面热阻耦

合层。如图 4 所示, 通过冷平台与蓝宝石冷链及钛合金隔热圈相结合的方案将单点冷源冷量非均匀传输到探测器与冷光学模组上, 实现了单点冷源与两点的冷量传输, 刚性冷链将冷量传输到两点后实现装载面上的二次温度均匀性<sup>[10]</sup>。

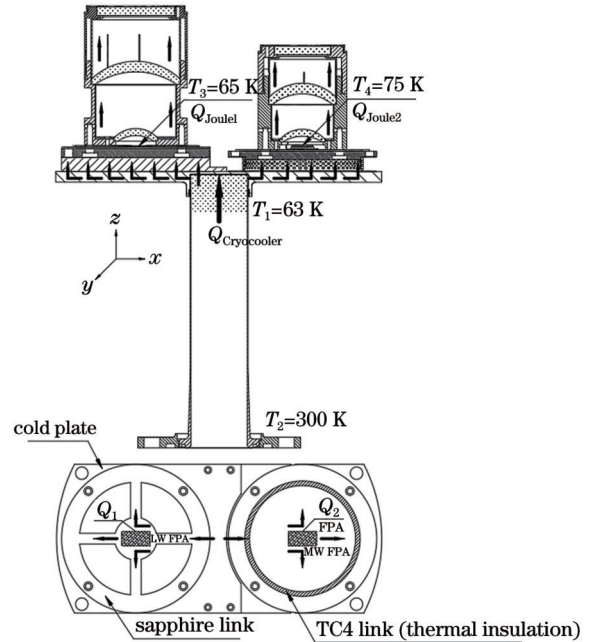


图 4 集成冷光学的双波段杜瓦内热传输过程示意图

Fig. 4 Heat transfer in Dewar with dual-band detectors and integrated cryogenic optics

从图 4 可以看出, 杜瓦内冷指圆柱端的冷量(制冷机传递的制冷量  $Q_{\text{Cryocooler}}$ )分别通过冷平台中心热接触面从下往上传递给中长波探测器、透镜组, 其值分别为  $Q_1$  和  $Q_2$ , 同时制冷量还需克服探测器工作时的焦耳热  $Q_{\text{Joule1}}$ 、 $Q_{\text{Joule2}}$ 。中波探测器在  $80 \text{ K}$  和  $65 \text{ K}$  附近的响应和信噪比相差不大, 但是探测器在更低温度所承受的热应力会更大, 因而需要对中波探测器进行适当的隔热控温设计。采用钛合金 TC4 隔热环, 同时在其圆柱面打孔, 适当增加热阻, 使得中波探测器工作在  $(75 \pm 5) \text{ K}$ 。长波探测器需在  $65 \text{ K}$  才能获得较好的信噪比, 在保证长波探测器低温可靠性的情况下, 需要尽量减小与制冷机耦合的冷平台热接触面到长波探测器之间的传热温差。因此, 长波探测器与冷平台之间采用热导率高、质量较轻的蓝宝石冷链作为热传输介质。最终在同一基准面(共基面)上实现了中长波探测器透镜组的温差式耦合安装。

相对于均温的探测器封装设计, 温差式结构对探测器和杜瓦组件的漏热存在一定影响, 现对两种结构进行对比分析。

温差式设计引起杜瓦漏热中的热传导变化主要体现在探测器至杜瓦接插件引线漏热, 引线漏热可以根据傅里叶导热定理计算<sup>[11]</sup>:



$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (6)$$

由于单根引线很小,故可简化为一维稳态热传导问题:

$$Q_c = -\lambda \frac{A}{L} \Delta T, \quad (7)$$

式中:  $A$  为导热面积;  $\Delta T$  为材料两端温度差;  $\lambda$  为材料在  $\Delta T$  温度范围内的平均热导率;  $L$  为导热长度。

引线采用 0.1 mm 直径锰铜丝, 常温到低温平均热导率  $\lambda$  取值为 17.83 W/(m·K), 引线长度  $L$  为 10 mm, 引线数为 35 根。当中波探测器温度为 65 K 时, 引线漏热为 115.1 mW; 当中波探测器温度为 75 K 时, 引线漏热为 110.2 mW。

同样地, 由于不同温度对杜瓦密闭腔体内的辐射热有所不同, 这里仅分析中波窗口对不同温度下的中波探测器及透镜组辐射热的差异<sup>[11]</sup>。

$$Q_R = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}, \quad (8)$$

式中:  $Q_R$  为任两个表面之间的辐射换热;  $A_1$ 、 $A_2$  为两个表面的面积;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  为两个表面的发射系数;  $X_{1,2}$  是两个表面之间的角系数;  $E_b$  是与表面同温度的黑体的发射功率, 且满足

$$E_b = \sigma_1 T^4, \quad (9)$$

式中:  $\sigma_1$  为斯特藩-玻尔兹曼常数,  $\sigma_1 = 5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>);  $T$  为绝对温度。

考虑到杜瓦内窗口帽内壁和透镜支撑外壁都是镀金表面, 仅对比计算窗口对透镜组和探测器的辐射热  $Q_{w-f}$ 。窗口与滤光片上表面之间的辐射热计算采用同轴圆盘模型, 尺寸如图 5 所示。

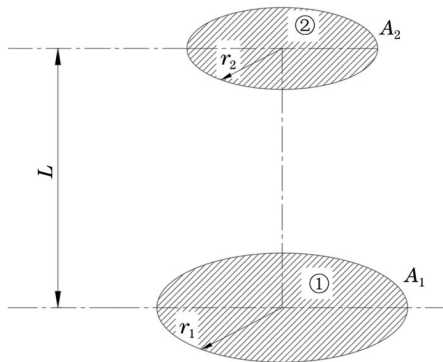


图 5 两同轴平行圆盘间的角系数

Fig. 5 Angle coefficient between two coaxial parallel disks

窗口与滤光片的半径  $r_1$  和  $r_2$  值分别是 14.5 mm 和 7.8 mm, 间距  $L$  为 15.4 mm。  $Q_{w-f}$  的角系数满足

$$X_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ S - \sqrt{S^2 - 4 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right], \quad (10)$$

式中:  $R_1 = \frac{r_1}{L}$ ;  $R_2 = \frac{r_2}{L}$ ;  $S = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$ 。

代入各尺寸, 可求出  $X_{1,2} = 0.436$ 。由于窗口进行

了增透, 即杜瓦外环境热辐射直接通过窗口照到滤光片之上, 同时再通过滤光片全部照射到带透镜的密闭腔内, 因而发射系数取  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.95$ ,  $A_1 = 6.60 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>,  $A_2 = 1.91 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>,  $T_2 = 300$  K, 再利用式 (10) 和式 (8) 可以计算出结果: 中波滤光片温度  $T_F$  为 75 K (中波探测器温度为 65 K) 时, 辐射漏热  $Q_{w-f} = 119.6$  mW; 中波滤光片温度  $T_F$  为 85 K (中波探测器温度为 75 K) 时, 辐射漏热  $Q_{w-f} = 119.3$  mW。

在轨应用时杜瓦窗口通过整机辐冷板及相应冷链进行制冷, 即窗口帽和窗口温度为 195 K (星上实际工作温度) 时, 假设探测器后光路以 195 K 黑体温度透过中波窗口, 则当  $T_F$  分别为 75 K 和 85 K 时, 对应的辐射漏热分别为 21.0 mW 和 20.7 mW。可以看出冷光学杜瓦组件的引入除了降低探测器背景辐射, 还能大幅降低杜瓦的寄生漏热。

### 2.3 共基准面低应力热耦合设计

考虑探测器深低温下的材料匹配性和装配耦合热应力, 对红外探测器和透镜组进行热应力仿真分析, 仿真材料参数及设置方法参见文献 [12-13], 分析结果如图 6 所示。探测器长波芯片碲镉汞体材料在 65 K 低温

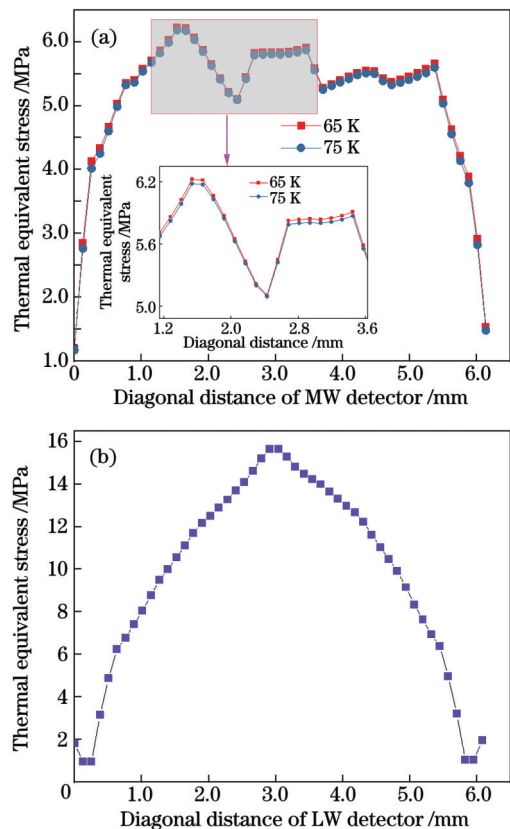


图 6 探测器模块对角线热应力仿真数据。(a) 65 K 和 75 K 时中波探测器对角线热应力仿真曲线; (b) 65 K 时长波探测器对角线热应力仿真曲线

Fig. 6 Thermal stress simulation of IR detectors on diagonal. (a) Thermal stress simulation of MW detector on diagonal at 65 K and 75 K; (b) thermal stress simulation of LW detector on diagonal at 65 K

工作时所承受的冷缩最大应力为 15.8 MPa, 杜瓦组件经多次液氮测试及制冷机开关机测试后探测器性能无异常变化, 表明该封装结构可以满足探测器长期使用的可靠性要求。

从图 6 的仿真结果可以看出, 探测器温度增加 10 K, 探测器所受的热应力减小 17.7%。此外, 中波、长波探测器在 65 K 时所受的热应力均不超过 16 MPa, 小于碲镉汞探测器一般能够承受的 48 MPa 的应力水平<sup>[14]</sup>。

### 3 集成冷光学双波段杜瓦研制工艺

选用钛合金冷指可以在冷平台负载较重的情况下确保力学可靠性, 还能减小冷指低温端与环境的热传导。根据液氮环境下的测量结果, 钛合金冷指比不锈钢冷指漏热约小 160 mW。另外, 选用钛合金冷指也有利于与钛合金薄壁外壳实现激光焊接, 从而确保低温窗口与制冷机隔热。当然也可以采用波纹管形式进行隔热安装设计<sup>[15]</sup>, 但实施工艺较为复杂, 适用范围受限。为确保低温下红外探测器、低温透镜及滤光片的耦合封装热适配, 冷平台和透镜支撑一般选用膨胀系数比较匹配的可伐合金材料, 因而涉及到钛合金冷指与可伐合金冷平台钎焊。通过实验对比, 发现采用 Ti 基焊料可以获得焊缝浸润性较好的焊接接头, 但对薄壁钛合金容易产生溶蚀反应, 降低焊缝强度<sup>[16]</sup>; 而采用 Ag 基焊料则必须使用合适的钎焊工艺, 特别是要控制钎料达到流点温度时的真空度, 这样才可以获得较为理想的焊缝结构。钎焊实物照片如图 7 所示。从图 7 可以看出焊料饱满均匀, 浸润性较好。相对于 Ti 基焊料, Ag 基焊料在多次常温到低温 (300~77 K) 温度冲击时具有更为稳定的焊缝结构, 没有焊缝开裂、接头强度降低、漏气等风险。

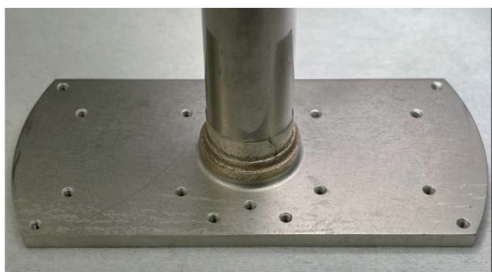


图 7 TC4 冷指与可伐合金冷平台钎焊结果

Fig. 7 Brazing of TC4 cold finger and Kovar cold plate

对该杜瓦制冷组件进行正弦振动及随机振动试验 (5~2000 Hz 频率范围, 总均方根加速度为 11g), 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见变化。

集成冷光学双波段杜瓦组件对探测器、透镜组等配准精度要求较高。配准主要包括两个方面: 一是单波段透镜与探测器 Z 轴向上的同心度、间距和俯仰配准, 二是双波段探测器组之间 XY 平面内配准和透镜组间

的 Z 轴向平行配准, X、Y、Z 方向见图 2。

为减小累积公差, 双波段探测器之间和单波段探测器与自身透镜组配准是交叉进行的。先通过整体限位夹具, 在大视场轮廓仪 (型号 V12B) 下放大 50 倍, 把中长波探测器模块微调固定后单点涂胶胶结固定在冷平台上, 最后螺接固定。然后可以进行单波段 Z 轴向配准。主要工艺方法如下。

透镜 2、透镜 3 的支撑冷屏的安装面以 A 面为基准, 进行一次性加工, 尽量保证轴向间距精度及 A、B、C 三个面的形位公差都在微米级别。高精度透镜支撑冷屏零件加工后测量两个台阶面 A、B 和 A、C 的高度尺寸、形位公差等并记录。在大视场轮廓仪下对中套准, 通过 5~7.5  $\mu\text{m}$  厚的薄片修垫完成中长波芯片及其与冷平台对中配准安装。具体安装结构如图 8(a) 和图 8(b) 所示。

在大视场轮廓仪下把两个透镜外边缘作为中心基准, 两个透镜光轴对准, 并胶结固定, 把透镜光轴外引至 D 面。透镜零件尺寸精度及要求如图 8(c) 所示。

根据外引的基准把透镜支撑冷屏与芯片中心配准。根据测量值, 在探测器基板与透镜支撑冷屏间加垫 5~20  $\mu\text{m}$  厚的垫片进行高度控制, 通过局部加减垫片进行俯仰调整。

双波段探测器组间配准工艺方法如下: 探测器芯片 XY 面中心基准和 Z 向高度外引至蓝宝石电极板光刻标志和蓝宝石电极板表面上, 通过光刻标志进行 X、Y 向的配准, 通过 Z 向偏差值确定透镜探测器组间的垫片厚度, 以修正波段间的 Z 向高度差。双波段透镜组间的轴向平行配准则通过外引的透镜组 Z 向光轴的基准平面 D 进行实测并在透镜组底部局部修垫而实现, 并最后在三坐标和影像仪下复测验证。图 9 为配准过程实物照片。

通过配准后, 探测器与透镜组之间的中心偏差最大实测值为 7.8  $\mu\text{m}$ , 探测器之间的轴向中心偏差最大实测值为 14.3  $\mu\text{m}$ 。

### 4 集成冷光学双波段杜瓦关键参数

由于中长波探测器直接胶结在蓝宝石电极板上, 而蓝宝石在 80 K 和 65 K 温度的热导率分别约为 700 W/(m·K) 和 1100 W/(m·K)<sup>[17]</sup>, 因而探测器理论上具有非常好的温度均匀性。通过制冷机控制长波探测器的温度为 65 K, 温度均匀性为 0.08 K, 中波探测器的温度为 73 K 左右, 温度均匀性为 0.36 K。

探测器杜瓦组件与制冷机耦合后开机试验, 记录中长波透镜组的降温过程。图 10 为中长波透镜组件从室温降至低温的曲线, 可以看出当探测器控温在 65 K 时, 长波透镜 2 和透镜 3 从 15 min 开始温度分别稳定在 68 K 和 70.5 K。中波探测器实际温度约 73 K, 中波透镜 2 和透镜 3 从 26 min 左右开始温度分别稳定在 80.5 K 和 81 K。



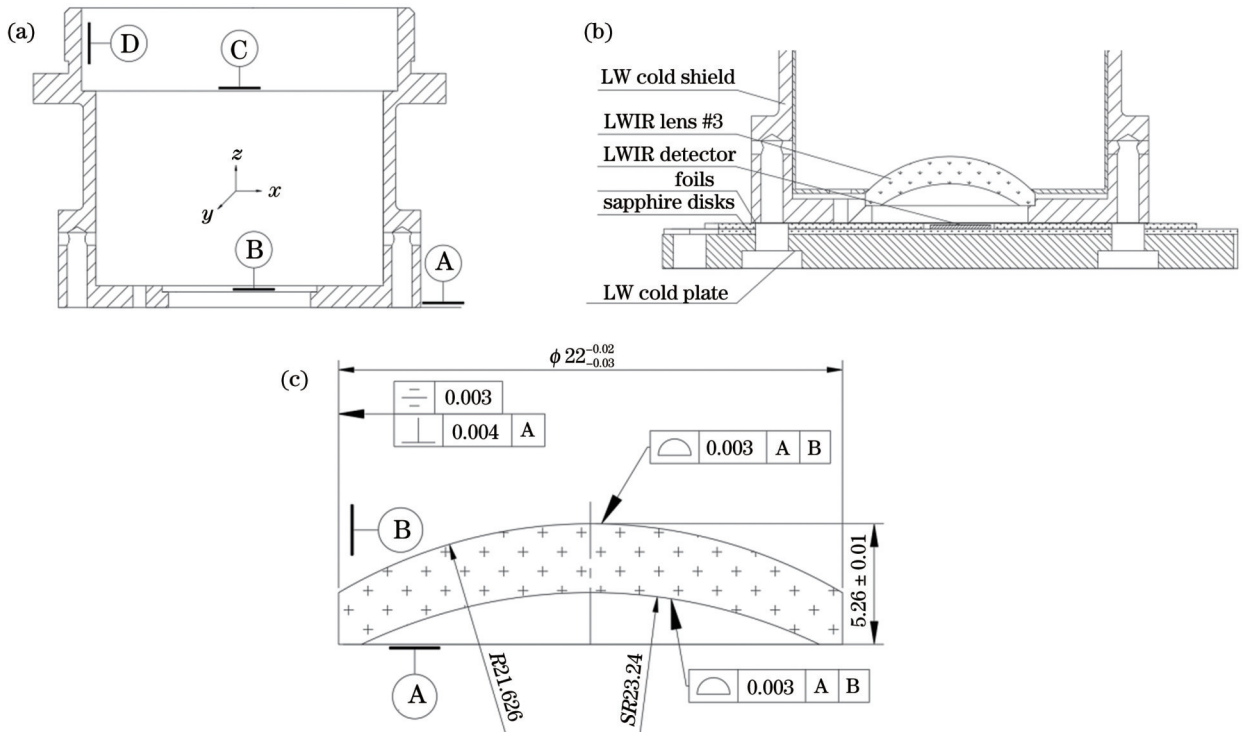


图 8 单波段探测器与透镜对中配准示意图。(a)透镜支撑冷屏结构示意图;(b)探测器与冷平台及透镜支撑冷屏对中安装示意图;(c)透镜零件尺寸精度及要求

Fig. 8 Schematic diagram of alignment between detector and lenses. (a) Structure drawing of cold shield for lenses; (b) assembly drawing of detector, cold plate and cold shield; (c) lens dimensions and accuracy requirement

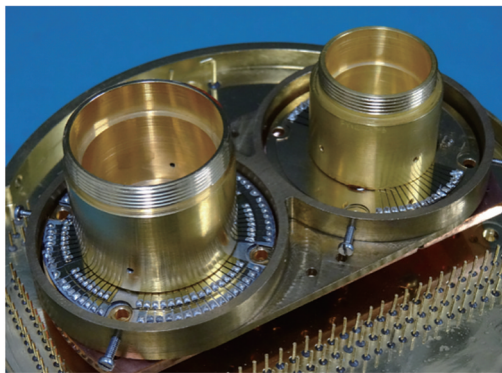


图 9 中长波探测器和透镜组配准过程照片

Fig. 9 Photograph of alignment process between detectors and lenses

从实际测试数据看,中长波探测器透镜组纵向传热温差较大。中波探测器温度与设计值有一定差值,这应该与传热界面较多、安装过程中螺接扭力控制的接触热阻及隔热钛合金 TC4 的侧面开孔数等有关。若需要实现中长波探测器精确的温差控制,需要不断试验优化验证,考虑到中波探测器承受的应力情况及实际杜瓦冷损的控制,目前组件内的温度场完全满足工程使用要求。

杜瓦组件冷损测试沿用液氮称重法。在室温下,用电子天平(型号 UW6200H)实时跟踪测量注入液氮的杜瓦成品的质量,计算出杜瓦冷损。测量了四个杜瓦,其液氮 77 K 下冷损值分别为 821 mW、808 mW、

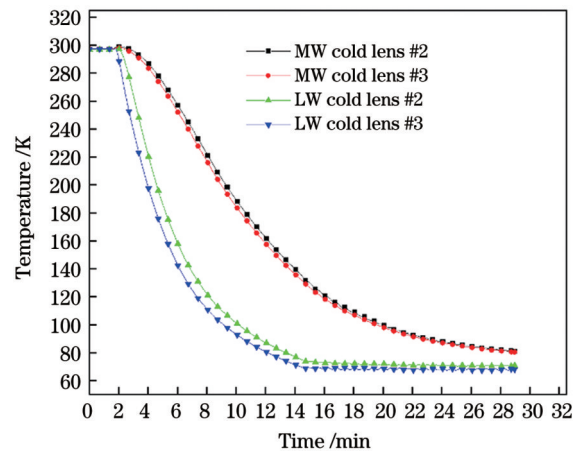


图 10 中长波透镜组降温曲线

Fig. 10 Cooling curves of dual-band lenses in Dewar

842 mW 和 804 mW。在轨应用时根据制冷功耗可以得到杜瓦在 65 K 长波工作温度下、窗口帽为 195 K 的情况下冷损值约为 620 mW(此值包含杜瓦内制冷耦合面到探测器端的温差所消耗的制冷机功耗)。在冷背景下,直径超过 120 mm、高度超过 140 mm 的集成冷光学杜瓦冷损值控制在一个较低的水平,有利于降低制冷机的输入功耗。这样制冷机在较小活塞行程下可以把探测器制冷至 65 K,使得探测器杜瓦制冷组件实现了近 7 年的在轨寿命(目前在轨仍工作正常)。图 11 为 FY4 大气垂直探测仪集成冷光学双波段杜瓦封装照片。

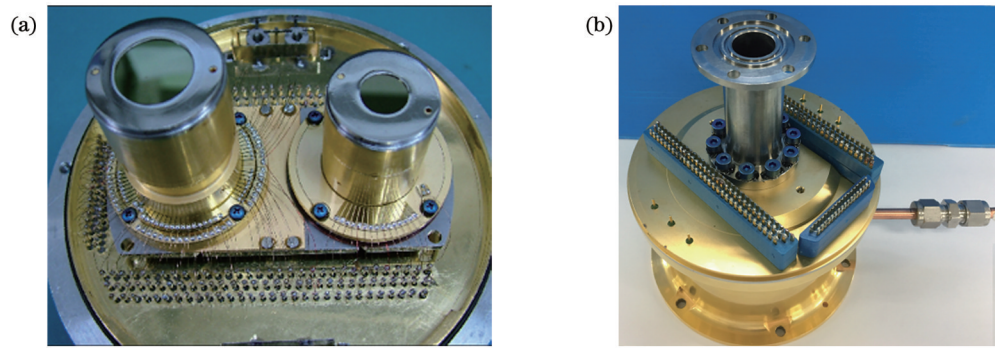


图 11 FY4 大气垂直探测仪杜瓦封装照片及产品实物图。(a) 中长波探测器及透镜组集成封装照片；(b) 中长波红外杜瓦组件实物照片  
Fig. 11 Photo of packaging process of detectors Dewar assembly with integrated optics for GIIS of FY-4. (a) Packaging photo of dual-band IR detectors with integrated optics; (b) photo of dual-band detectors Dewar

## 5 结 论

集成冷光学的双波段红外探测器杜瓦组件在空间大视场及超光谱的航天应用中具有较大优势, 具有重要意义。本文着重解决了较大冷平台局部高温均匀性、双波段温差实现、冷光学集成探测器后低应力、高力学负载冷平台的探测器杜瓦组件的力学可靠性、低漏热控制等关键技术, 实现了杜瓦热负载 819 mW, 中波工作于 73 K, 冷面温度均匀性 0.36 K, 长波工作于 65 K, 冷面温度均匀性 0.08 K, 探测器与透镜组配准精度偏差优于  $\pm 10 \mu\text{m}$ , 探测器光学模组间配准偏差优于  $\pm 15 \mu\text{m}$ 。对杜瓦组件进行了地面力学、热学的环境适应性验证, 为新一代极轨气象卫星大气垂直探测提供必要的技术支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 张磊, 林国画, 康健, 等. 一种光学集成式杜瓦组件的设计与制备[J]. 激光与红外, 2019, 49(9): 1075-1079.  
Zhang L, Lin G H, Kang J, et al. Design and preparation of a Dewar assembly integrated with optics[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(9): 1075-1079.
- [2] Singer M, Oster D. Design of a cryogenic IR detector with integrated optics[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7660: 76601Z.
- [3] Hirsh I, Shkedy L, Chen D, et al. Hybrid dual-color MWIR detector for airborne missile warning systems[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8353: 83530H.
- [4] Li J, Schmit T J, Menzel W P. Advanced Baseline Sounder (ABS) for future Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES-R and beyond)[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4895: 103-110.
- [5] Key R, Sander S, Eldering A, et al. The geostationary Fourier transform spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8515: 851506.
- [6] 华建文, 毛建华. “风云四号”气象卫星大气垂直探测仪[J]. 科学, 2018, 70(1): 4, 24-29, 63.  
Hua J W, Mao J H. Geostationary interferometric-type infrared sounder (GIIRS) on FengYun No. 4 metrological satellite[J]. Science, 2018, 70(1): 4, 24-29, 63.
- [7] 李路, 倪卓娅, 漆成莉, 等. 风云四号 B 星干涉式红外探测仪发射前辐射定标[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0630001.  
Li L, Ni Z Y, Qi C L, et al. Pre-launch radiometric calibration of geostationary interferometric infrared sounder on FengYun-4B satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0630001.
- [8] 王战虎. 星载干涉式大气垂直探测仪光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.  
Wang Z H. Study on optical system of spaceborne interferometric atmospheric vertical detector[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [9] 宋小龙, 安继儒. 新编中外金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
Song X L, An J R. Compilation of new Chinese and foreign metal materials handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [10] 李俊, 王小坤, 孙闻, 等. 超长线列双波段红外焦平面探测器杜瓦封装技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1104003.  
Li J, Wang X K, Sun W, et al. Study on Dewar package for dual-band long linear IR FPA detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1104003.
- [11] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 6, 399.  
Tao W Q. Heat transfer[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019: 6, 399.
- [12] 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.  
Xia C X, Li J, Sun W, et al. Research on evaluation method of radiant heat of long linear IR FPA Dewar[J]. Infrared Technology, 2017, 39(9): 794-797.
- [13] 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.  
Chen X, He K, Wang J X, et al. Thermal cycling reliability of linear HgCdTe infrared detectors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(4): 369-374.
- [14] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 363.  
Yang J R. Physics and technology of HgCdTe materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 363.
- [15] 陈俊林, 王小坤, 朱海勇, 等. 冷光学用多波段长波红外探测器杜瓦封装技术[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2110002.  
Chen J L, Wang X K, Zhu H Y, et al. Dewar packaging technology of multiband long-wave infrared focal plane array detectors for cryogenic optics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2110002.
- [16] 郝振贻, 严彪. TC4 钛合金与无氧铜、可伐合金真空钎焊工艺研究[J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41(1): 32-36.  
Hao Z Y, Yan B. Study on vacuum brazing technology of TC4 titanium alloy with oxygen-free copper and Kovar alloy[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2020, 41(1): 32-36.
- [17] Suzuki T, Tomaru T, Haruyama T, et al. Thermal conductance through sapphire-sapphire bonding[EB/OL]. [2022-11-02]. <https://galprop.stanford.edu/elibrary/icrc/2003/proceedings/FILES/PDF/772.pdf>.

# Dewar Assembly Integrated with Cryogenic Optics for Dual-Band IR Detector

Zeng Zhijiang<sup>1,2,3</sup>, Yang Liyi<sup>1,2</sup>, Hao Zhenyi<sup>1,2</sup>, Xu Lin<sup>1,2</sup>, Fan Guangyu<sup>1,2</sup>, Fan Cui<sup>1,2,3</sup>, Li Jun<sup>1,2</sup>,  
Li Xue<sup>1,2</sup>, Gong Haimei<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

## Abstract

**Objective** For some infrared (IR) optical systems, due to the wide field of view of the instrument, some cryogenic optical lenses must be packaged near the detector, otherwise the entire optical system will be very complicated. Moreover, for weak signal and multi-spectral detection, it is necessary to reduce the background. Except IR detectors, if several cold filters and lenses are housed in Dewar, then it is conducive to eliminating the infrared radiation background, improving system sensitivity and integration. This paper presents the package of mid-wave infrared (MWIR) and long-wave infrared (LWIR) detectors Dewar with integrated cryogenic optics. The micron-scale alignment requirement of a  $32 \times 4$  array detector with a pitch of  $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$  and a dual-lens module at each band is comprehensively described. The key parameters such as detectors temperature uniformity, differential temperature packaging and low thermal mass are analyzed. We hope that Dewar package structure integrating 4 lenses, 2 optical filters and 2 detectors will be successfully developed.

**Methods** First, several lenses and detectors are packaged, so the size of the Dewar cold platform is large, and the mass of the infrared detector Dewar cold finger and its top load reaches 364.7 g. If the acceleration in space application is  $500 \text{ m/s}^2$ , the maximum stress at the root of the cold finger can be calculated to be 352.9 MPa. In order to ensure the reliability under environmental vibration, it is necessary to use a new titanium alloy TC4 as the cold finger material, which can not only ensure sufficient mechanical strength, but also effectively reduce Dewar thermal loss. Secondly, in order to solve the problems of large longitudinal and axial thermal resistance between the detector, the cold lenses and the cold filter, as well as the low temperature uniformity of the detector array, both low thermal resistance heat transfer and the structure to realize differential temperature of the detectors are required. The cold platform is designed as the shared base of alignment for MWIR and LWIR detectors and cryogenic optics lenses. The structures of the sapphire cold link of the LWIR and the titanium alloy heat insulation ring of the MWIR are shown in Fig. 4. Through the combination of cold platform, sapphire cold link and titanium alloy heat insulation ring, the cooling capacity from the tip of cooler is non-uniformly introduced to the detector and the cryogenic optics lenses and filters, and the single-point cooling capacity is effectively transferred to different temperature zones. Thirdly, considering the material matching and assembly thermal stress of the detector at low temperature, the material whose linear expansion coefficient at low temperature matches the detector, lens, and filter is selected as the supporting structure material for assembling the cryogenic optics modules. The thermal stress simulation analysis of the infrared detector and optics is carried out, and the analysis results are shown in Fig. 6. The maximum cold shrinkage stress of the detector LWIR HgCdTe material is 15.8 MPa when it works at a low temperature of 65 K. Such a stress is relatively low.

**Results and Discussions** The selection of titanium alloy cold fingers can not only ensure the mechanical reliability, but also reduce the heat conduction between the top of the cold fingers and the environment. Measured under liquid nitrogen environment, the thermal loss of titanium alloy cold fingers is about 160 mW smaller than that of stainless steel cold fingers. The brazing of the titanium alloy cold finger and the Kovar cold platform is realized by Ag-based solder. The weld structure after multiple temperature cycles from 300 K to 77 K is normal. The photo of the brazing sample is shown in Fig. 7. The average thermal loss value of the four Dewar assemblies tested at 77 K is 818.8 mW. In the orbit application, when the LWIR detector works at 65 K and the temperature window of Dewar is 195 K, the thermal loss is about 620 mW. In experiment, the LWIR detector works at 65 K, and its temperature uniformity is 0.08 K. Meanwhile, the temperature of the MWIR detector is about 73 K, and its temperature uniformity is 0.36 K. The temperatures of the long-wave lens 2 and lens 3 are stabilized at about 68 K and 70.5 K, and the temperatures of the mid-wave lens 2 and lens 3 are stabilized at about 80.5 K and 81 K, as shown in Fig. 10. According to the experimental data in Fig. 10, the longitudinal thermal resistance of the MWIR and LWIR detector-optics is relatively large. There is a bit difference about the temperature between the actual MWIR detector and the designed one, which should be related to too many heat transfer interfaces, the contact thermal resistance controlled by the screw torque during installation, and the shape of special heat-insulating titanium alloy TC4 rings. The adjustment of axial distance and pitch is adopted by partially adding different polyimide shims with the thickness of  $5\text{--}20 \mu\text{m}$  between the detector substrate and the cold shield, combined with assembly and testing by several instruments. Finally, the maximum measured value of alignment between the detector and the cryogenic optics lenses is  $7.8 \mu\text{m}$ , and the axial center deviation value



between the detectors is  $14.3\ \mu\text{m}$ .

**Conclusions** This paper presents the MWIR and LWIR detectors Dewar assembly with integrated cryogenic optics. The new structures in Dewar such as monolithic cold platform and lens support (cold shield) with low thermal mass are designed to realize the alignment of single detector and its related cryogenic optics lenses, to solve the high-precision alignment between two detector-lens modules, and to solve new brazing processes of single high-strength cold finger and so on. This paper also proposes the key parameters of the Dewar such as detectors temperature uniformity, differential temperature packaging and low thermal mass. The thermal mass of Dewar at liquid nitrogen temperature is less than  $0.85\ \text{W}$ . The LWIR detector allows for focal plane array (FPA) operation at the temperature of  $65\ \text{K}$ , with a temperature uniformity of  $0.08\ \text{K}$ . Meanwhile, the MWIR detector is balanced at the temperature of  $73\ \text{K}$ , with a temperature uniformity of  $0.36\ \text{K}$ . The misalignment between the detector and the lenses is less than  $\pm 10\ \mu\text{m}$ , and the misalignment between two detector-lens modules is less than  $\pm 15\ \mu\text{m}$ . The Dewar integrating cryogenic optics has been testified by relevant environment reliability, and has been successfully applied to Geostationary Interferometric Infrared Sounder of the Fengyun-4 meteorological satellite.

**Key words** optical design; dual-band infrared detector; integrated Dewar packaging; cryogenic optics; cryogenic lenses; high precision alignment