

#### 40K双波段长波探测器冷箱封装技术研究

王小坤 陈俊林 罗少博 曾智江 李雪

#### Research on packaging technology for 40 K dual-band long-wave detectors

Wang Xiaokun, Chen Junlin, Luo Shaobo, Zeng Zhijiang, Li Xue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230654>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 局域光场增强的量子阱红外探测器 (特邀)

Quantum well infrared detector enhanced by local light field (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211009 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211009>

#### 超长线列双波段红外焦平面探测器杜瓦封装技术研究

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

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1104003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1104003>

#### 红外探测器杜瓦封装多余物的衍射分析及控制

Diffraction analysis and control of remainders in infrared detector Dewar packaging

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20200177 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200177>

#### InAs/GaSb二类超晶格中/短波双色红外焦平面探测器

Mid-/short-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1104001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1104001>

#### GaN基多量子阱红外探测器研究进展 (特邀)

Recent progress of GaN based quantum well infrared photodetector (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211020 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211020>

#### 多波段冷光学红外成像终端研制

Development of cold optical infrared imaging terminal with multiband

红外与激光工程. 2018, 47(9): 904001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0904001>

## 40 K 双波段长波探测器冷箱封装技术研究

王小坤<sup>1,2</sup>, 陈俊林<sup>1,2</sup>, 罗少博<sup>1,2</sup>, 曾智江<sup>1,2</sup>, 李 雪<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 冷光学技术是弱目标及多光谱红外探测的重要支撑技术。为了实现低温光学系统温度精确控制和防污染,一般多将低温光学与探测器集成在冷箱内。某高光谱相机需要 1 个 320×64 量子阱探测器和 1 个 320×64 II 类超晶格探测器共面拼接,集成双波段微型滤光片,形成长波双波段探测杜瓦组件,探测器工作所需的 40 K 低温环境由脉管制冷机提供。杜瓦采用无窗口设计,并通过柔性波纹管将杜瓦外壳与冷箱外壳集成,以实现气密性集成和光校调节。针对 40 K 温区双波段探测器封装的三维拼接、探测器及滤光片的低应力封装、制冷机与探测器的高效热传输等难点,对探测器的三维拼接、40 K 温区高效热传输、探测器低应力集成的热层结构、低应力滤光片支撑、杜瓦与制冷机耦合等进行研究,创新性提出了三点 Z 向调节拼接方法、探测器 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载体复合钼基板和钼冷平台的热层结构、双波段滤光片集成的钼支撑结构、带应力隔离的冷平台与制冷机过盈装配的耦合方法,最终实现了 40 K 温区下双波段探测器平面度优于±2.06 μm(RMS)、探测器的低温应力小于 22.06 MPa、双波段滤光片低温形变小于 8.55 μm、探测器与制冷机温度梯度为 2.6 K。40 K 长波双波段红外探测器冷箱杜瓦组件经过 2 000 h 通电老练和 300 次开关机试验验证,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:** 杜瓦; 冷光学; 量子阱; 二类超晶格; 40 K 温区

**中图分类号:** TK123 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230654

### 0 引言

红外高光谱成像技术是集成像与光谱于一体,以纳米级高光谱分辨率,在获取目标二维空间图像信息的同时,同步获取目标的连续精细光谱信息,使空间遥感的探测能力大为提高。相较于可见、近红外、短波红外谱段,中长波红外(5.0~15 μm)高光谱成像技术具有独特的优势,光谱覆盖范围达到了近万纳米,能够获取目标自身的热辐射精细光谱信息。不仅可以有效地识别地物的成分,还可以有效的区分地物的构造特征,获取地物的温度及发射率等参数信息,可广泛应用于陆地、大气、海洋等观测中。红外高光谱成像技术需要突破光谱精细化、低背景辐射和低暗电流焦平面探测器等关键技术<sup>[1]</sup>,全光路低温制冷光学系统的优点是最大限度的降低背景辐射,但在大气环境下,无法在目标温度下直接测试,其制冷量需求

大,此系统广泛应用于天文观测等。国外全光路低温制冷光学系统有美国 JWST 和 SPITZER 太空望远镜、欧空局的 ISO 和 IRAS 红外观测卫星、日本航天局 AKARI 红外天文望远镜等<sup>[2]</sup>。国内全光路低温制冷光学系统应用在对地观测,主要有 CASEarth<sup>[3]</sup>、FY-4(01)<sup>[4]</sup>、FY-4(02)<sup>[5]</sup>。局部低温制冷的光学系统优点是可在大气环境下实现低温测试,广泛应用于对地观测中。目前国外先进的军事地基大型光电望远镜观测基站 AEOS、Gemini、AMICA 等均配备了冷光学红外成像终端,国内的中国科学院长春光学精密机械与物理研究所地基望远镜、合肥低温电子研究所研制的红外冷光学真空系统、中国科学院上海技术物理研究所的大气辐射超光谱探测仪等<sup>[6]</sup>等也采用了冷光学成像系统。

中长波红外高光谱相机的背景抑制方式,主要有制冷型渐变滤光片、全光路低温制冷、光谱仪部件低

收稿日期:2023-11-22; 修订日期:2023-12-15

作者简介:王小坤,男,正高级工程师,硕士生导师,硕士,主要从事红外探测器组件封装设计、低温集成封装及可靠性方面的研究。

温制冷。国内目前大多采用光谱仪部件在真空冷箱内低温制冷,红外探测器制冷组件与真空冷箱共腔。40 K 温区的双波段红外探测器冷箱封装技术未见相关报道。冷箱低温光学系统与红外探测器共腔的无窗口设计,可以有效减低杜瓦窗口及支撑结构对红外探测器的背景辐射,同时减少额外的制冷热管及冷链带来的冷量损失。基于降低器件暗电流的考虑,需要将双波段长波红外探测器降低到 40 K。多波段探测器的三维拼接、探测器和滤光片的低温下性能和可靠性、高效热传输等是封装中不容忽视的问题。文中对双波段探测器三维调节、40 K 温区高效热传输、滤光片低应力支撑、杜瓦与制冷机耦合等进行研究,提出了三点支撑 Z 向调节、双波段滤光片集成的钼支撑结构、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载体复合钼基板和钼冷平台的热层结构、杜瓦与制冷机过盈装配的耦合的方法,成功研制出 40 K 温区的双波段长波红外探测器杜瓦冷箱组件,该组件经历了鉴定级力学、高低温循环、长时间通电的寿命老练试验,现已成功在轨应用,对于我国低温光学红外光电探测具有一定的推动意义。

## 1 40 K 双波段长波红外探测器杜瓦冷箱特点

### 1.1 器件及拼接基板

在对地快速成像、窄带探测航天应用中,常用的探测器主要有碲镉汞、II 类超晶格、量子阱红外探测器,尽管碲镉汞探测器具有更高的量子效率,但是在长波(8~14 μm)及甚长波(>14 μm)工作波段,量子阱红外探测器具有较好的均匀性、抗辐射性、低成本以及工艺成熟性,同时具有更高的波段可拓展性<sup>[7]</sup>。而 II 类超晶格作为新一代探测器,具有更高的探测率和响应率,同时具有更低的暗电流,因此在夜视、地物目标探测、环境监测等领域应用广泛<sup>[8]</sup>。

文中采用将 II 类超晶格探测器和量子阱探测器胶接在一个陶瓷基板上,并集成封装于一个杜瓦内。其中,II 类超晶格探测器和量子阱均由 320×64 探测器、读出电路、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载体组成,模块的结构如图 1 所示。II 类超晶格探测器和量子阱在钼拼接基板上(图 2)进行拼接,其中,空间维为 320 方向,光谱维为 64 方向,在光谱维方向上,II 类超晶格探测器和量子阱探测器按照相机要求进行拼接,其中 II 类超晶格探测器和量子阱探测器在光谱维度中心距为 6.48 mm,

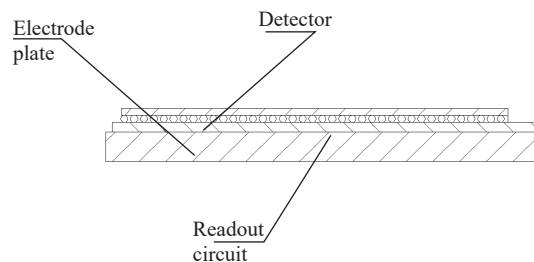


图 1 芯片结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of chip structure

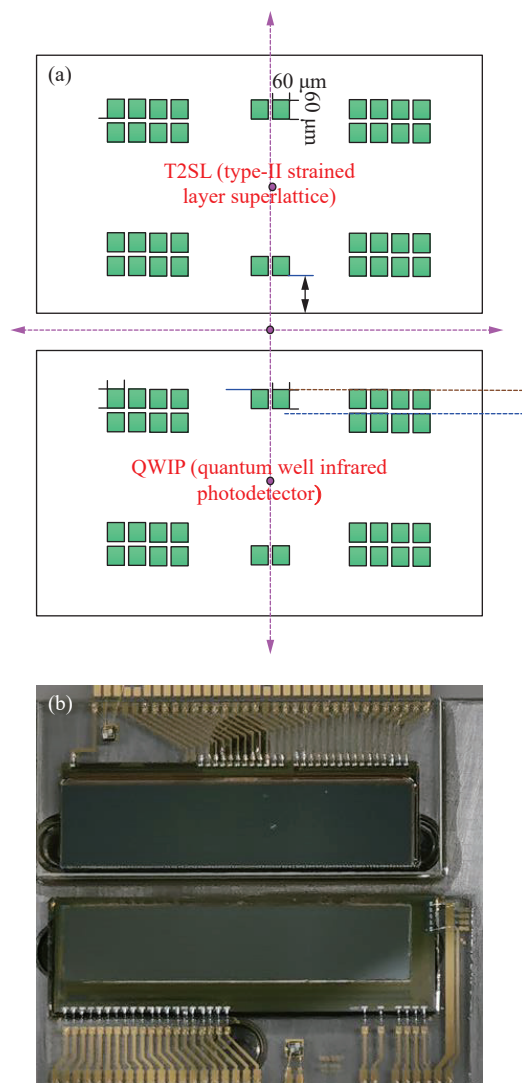


图 2 多波段拼接示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi band splicing

空间维对齐布置。

### 1.2 40 K 双波段长波红外探测器冷箱杜瓦

将 T2SL320×64 和 QWIP320×64 共面集成在一个杜瓦组件内,然后与制冷机分置式耦合,形成长

波探测器制冷组件。杜瓦结构如图 3 所示: 1) 在杜瓦内, 焦平面探测器的芯片模块采用平行拼接方式分布在拼接基板上; 2) 采用多节冷光阑和一个滤光片支架结构降低背景辐射和杂散光; 3) 杜瓦组件设

计窗口帽单独测试试验, 与冷箱集成时去除; 4) 杜瓦组件设计波纹管, 与冷箱进行真空密封及柔性连接, 波纹管具有满足光校所需要的双向横向位移和轴向位移。

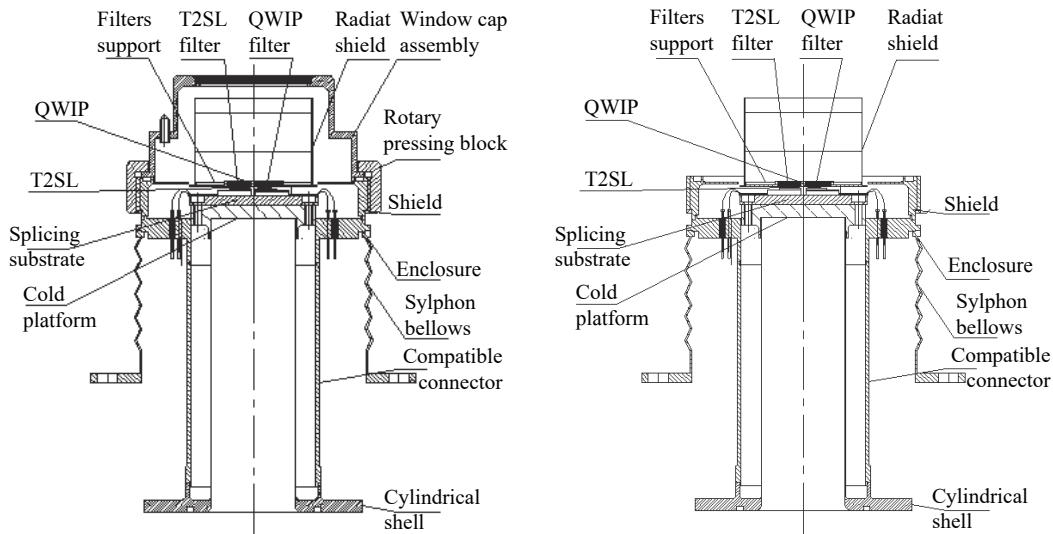


图 3 杜瓦结构图

Fig.3 Diagram of Dewar structure

### 1.2.1 双波段红外探测器三维调节及低温校准

目前, 现有的拼接方法主要有两种: 第一种是实测探测器尺寸, 通过不同直径的空心微小珠和粘合剂在填充间隙来实现多模块之间的拼接<sup>[9]</sup>; 第二种是在一个平面度高的胶接平面的上方通过吸盘将探测器定位在所需要的位置, 在胶接平面和探测器之间填充不易变形且温度特性良好的胶, 等待胶干后撤去吸盘, 拼接探测器的平面度依靠吸盘每次放置焦平面的高度保证, 其平面度误差依靠胶来调整<sup>[10]</sup>。文中提出了三点支撑调节 Z 向、然后调节 X、Y 向的方法实现两个 320 pixel×64 pixel 探测器拼接。拼接结构和拼接原理见图 4。在大视场显微镜下对红外焦平面模块调整 X、Y 向精度, 实现流程如下:

1) 对焦平面模块和拼接基板实测平面度数据, 并计算出 Z 向预调节量;

2) 根据实测配对数据, 在拼接基板的调节孔内部安装平面度较好的调整垫块, 并在拼接基板上预先放置探测器模块, 利用激光轮廓仪在拼接基板上测出红外焦平面探测器的平面度和平行度;

3) 通过机械微调结构, 调整两模块共面, 在拼接

后的每个模块上各取 10 个点, 如图 5 所示, 通过编程化的软件处理点数据坐标, 用最小二乘法拟合平面, 最后算出整体平面度值;

4) 取下焦平面模块, 并利用低温胶将其调整垫块固定和固化。

探测器模块调节的流程图如图 6 所示, 对双波段探测器进行了低温下形变测试及评价, 测试平面度结果: 17 μm(PV 值±8.5 μm)。由此, 可根据公式 (1) 计算出 RMS 值为 4.12 μm(±2.06 μm)。

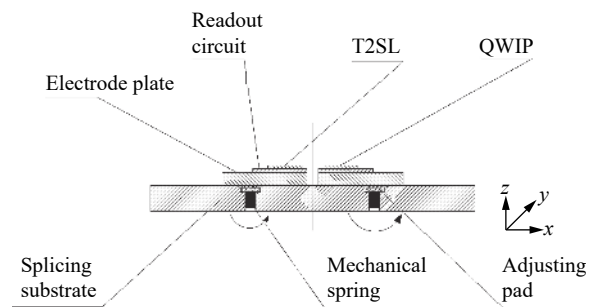


图 4 双波段探测器平面度调节机构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the flatness adjustment mechanism for dual band detectors

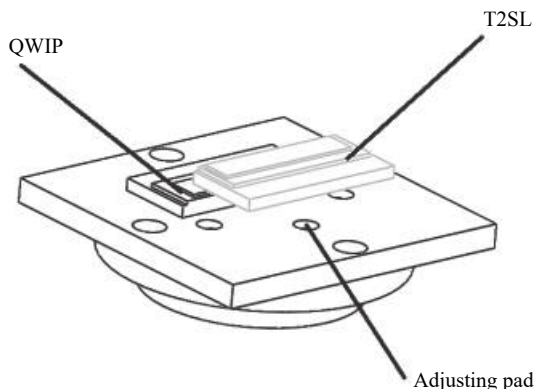


图 5 探测器模块三维调节示意图

Fig.5 Schematic diagram of three-dimensional adjustment of detector module

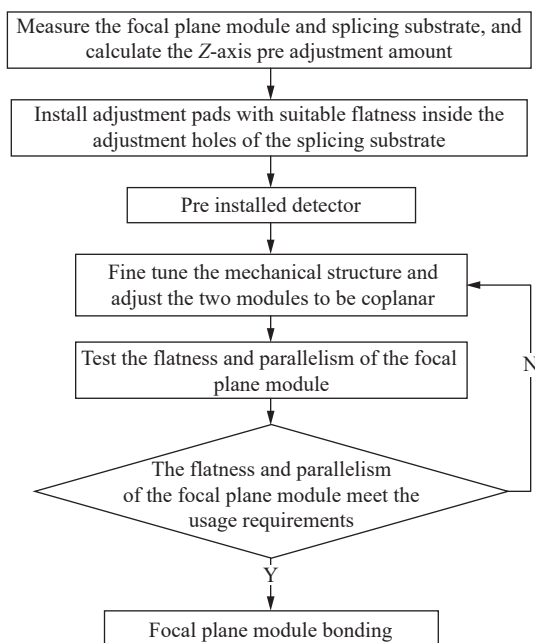


图 6 探测器模块调节流程图

Fig.6 Flow chart of detector module adjustment

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (1)$$

式中:  $n=20$ ;  $X_i$  为  $Z$  轴坐标与拟合平面的距离值;  $\bar{X}$  为  $Z$  轴坐标与拟合平面的平均距离值。

测试结果的误差一般有设备误差、基板误差和调节结构误差。文中选取的三维调节测试设备为高精度激光影像仪设备,其测试误差为  $2 \mu\text{m}$  左右<sup>[10]</sup>,拼接基板、调节机构自身的状态以及低温下的形变也是影响测试结果的误差之一。

### 1.2.2 双波段用 40 K 温区高效热传输且与探测器低应力热层

QWIP 器件对温度的敏感性比较高,研究表明 QWIP 量子阱红外探测器在 40~50 K 温区下其阻抗与读出电路匹配好,工作温度的降低可以使得 QWIP 和 T2SL 探测器获得低的暗电流和低的器件噪声<sup>[11-12]</sup>。但温度降低到 40 K,对杜瓦冷平台及拼接基板的选择、探测器与冷平台组装后的应力是个挑战。

近年来,高热导率和低膨胀系数的陶瓷材料大量应用于杜瓦封装中,但是陶瓷材料的高可靠焊接需要重点突破。基于热导率和可焊性方面的考虑,文中选择低温下热导率较高的钼材料(40 K 低温下其热导率约为  $344 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )作为冷平台热层结构设计。热层选择方案如图 7 所示,拼接基板选择 AlN 或钼,探测器的电极板选择  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或 AlN,其厚度定量为 1.5 mm。冷平台与杜瓦芯柱采用钎焊工艺,冷平台、拼接基板和探测器电极板采用耐低温胶胶接。对不同厚度的拼接基板进行 40 K 温区下的温度梯度和低温应力进行分析,热层结构材料选择如表 1 所示,仿真分析时,将热层结构适当简化,考虑到耐低温胶对热应力影响较小,且加入仿真模型后仿真难度增大,仿真模型中忽略耐低温胶对热应力的影响,选取的结构参数如表 2 所示<sup>[13-14]</sup>。

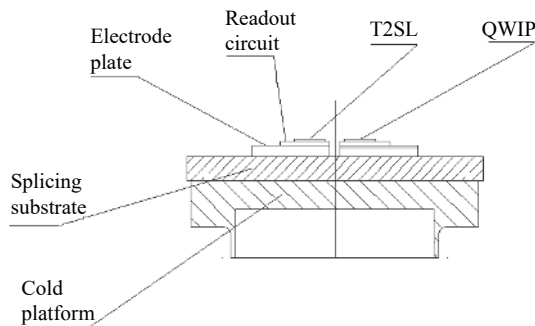


图 7 40 K 温区的热层结构设计

Fig.7 Thermal layer structure design for 40 K temperature zone

文中通过不同热层结构进行仿真分析发现,对比热层结构一和热层结构三, T2SL 探测器和 QWIP 探测器具有接近的低温应力。热层结构一的 T2SL 探测器的低温应力为  $19.162\sim 20.313 \text{ MPa}$ , QWIP 探测器的低温应力为  $21.392\sim 23.484 \text{ MPa}$ ,而热层结构三的 T2SL 探测器的低温应力为  $19.434\sim 24.979 \text{ MPa}$ , QWIP

表 1 热层结构材料选择

Tab.1 Material selection for thermal layer structure

ID	Cold platform	Splicing substrate	Chip electrode plate
Thermal layer structure I	Mo	Mo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Thermal layer structure II	Mo	Mo	AlN
Thermal layer structure III	Mo	AlN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Thermal layer structure IV	Mo	AlN	AlN

表 2 封装结构材料参数

Tab.2 Packaging structure material parameters

Material	Average coefficient of thermal expansion $\alpha(10^{-6})$	Elastic modulus E/GPa	Poisson's ratio	Thermal conductivity $\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
1Mo	3.5	320	0.3	207.5
AlN	1.8	350	0.2	627.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0	300	0.26	25
Si	2.49	112	0.28	128
T2SL (InAs/GaSb)	5	63	0.31	48
QWIP	4.1	65	0.3	35

探测器的低温应力为 22.11~28.305 MPa。对比热层结构二与热层结构四, T2SL 探测器和 QWIP 探测器的低温应力为 53.152~63.226 MPa, 探测器低温应力均已超出其破坏应力。从温度梯度看, 由于 Mo、AlN 在低温的热导率很高且热导率接近, 温度梯度相差并不明显。

对于热层结构一和热层结构二有限元仿真分析结果如图 8 所示, 结果表明, 热层结构一相对于热层结构二, QWIP 和 T2SL 具有更低的低温应力, 其低温应力为 22 MPa 左右, 而热层结构二的低温应力为 52 MPa 左右。从 Mo 拼接基板的厚度看, 热层结构一的红外探测器随拼接基板厚度的增加其低温应力呈现逐渐增大的趋势, 但总体变化不大, 其中 QWIP 的低温应力从 21.392 MPa 增大到 23.484 MPa, 其中 T2SL 的低温应力从 19.162 MPa 增大到 20.313 MPa。热层结构二下的红外探测器随拼接基板厚度的增加其低温应力呈现逐渐减少的趋势, 但其低温应力均已超出其破坏应力, 这是由于 Mo 材料和电极板的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有更接近的膨胀系数, 其低温下的收缩较为一致。

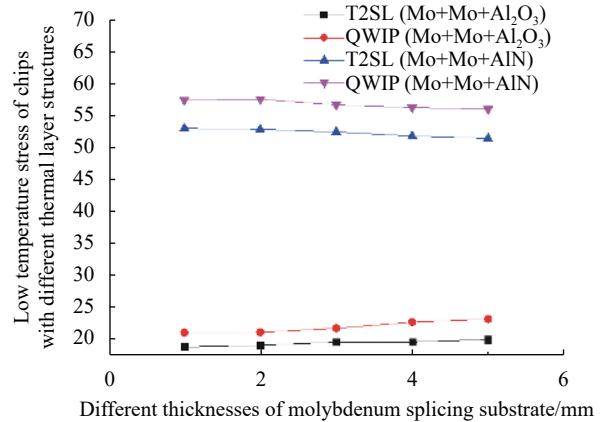


图 8 不同热层结构下的低温应力

Fig.8 Low temperature stress under different thermal layer structures

对于热层结构三和热层结构四有限元仿真分析结果如图 9 所示, 结果表明, 热层结构三相对于热层结构四, QWIP 和 T2SL 具有更小的低温应力, 其低温应力为 24 MPa 左右, 而热层结构四的低温应力为 56 MPa 左右。从 AlN 拼接基板的厚度看, 热层结构三和热层结构四的红外探测器随拼接基板厚度的增加其低温应力呈现逐渐增大的趋势, 但总体变化不大。其中热层结构三, QWIP 的低温应力从 22.11 MPa 增大到 28.305 MPa, 其中 T2SL 的低温应力从 19.434 MPa 增大到 24.979 MPa。热层结构四的探测器低温应力均已超出其破坏应力。这是由于 Mo 材料和电极板的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有更接近的膨胀系数, 其低温下的收缩较为一致, 而拼接基板的 AlN 虽然与电路电极板 AlN 匹配, 但是与冷平台 Mo 材料并不匹

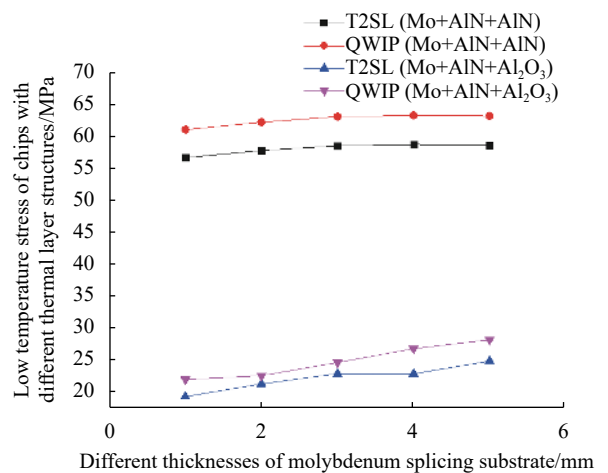


图 9 不同热层结构下的低温应力

Fig.9 Low temperature stress under different thermal layer structures

配,其低温下相对于 Mo 材料的收缩量更小,其界面拉扯更大,其产生的低温应力更大。

对于热层结构一和热层结构三有限元仿真分析结果如图 10 所示,结果表明热层结构一具有更低的低温应力,同时热层结构一的红外探测器随拼接基板厚度的增加其低温应力呈现逐渐增大的趋势,但均在其器件许用的应力范围内。基于三维调节和基板轻量化方面的考虑,选择 3 mm 厚的 Mo 材料作为芯片的拼接基板, T2SL、QWIP 红外焦平面探测器的低温应力为 19.897 MPa 和 22.059 MPa。

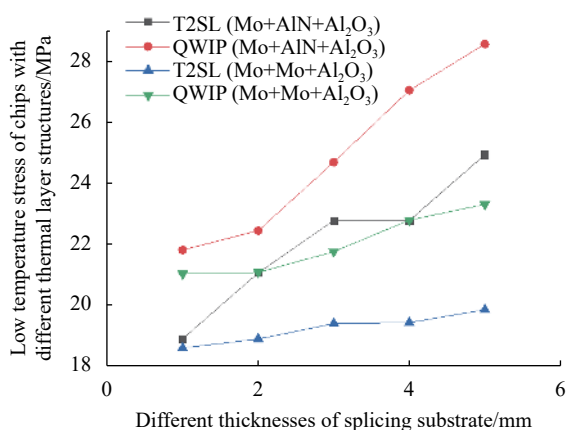


图 10 不同热层结构下的低温应力

Fig.10 Low temperature stress under different thermal layer structures

综合考虑,选择 Mo 冷平台+Mo 拼接基板+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极板作为双波段用 40 K 温区的低应力热层结构,同时对芯片在 40 K 温度下的低温形变进行了测试,结果如图 11 所示,其低温形变量为 14 μm 左右,红外焦平面探测器经历了高低温循环、长时间通

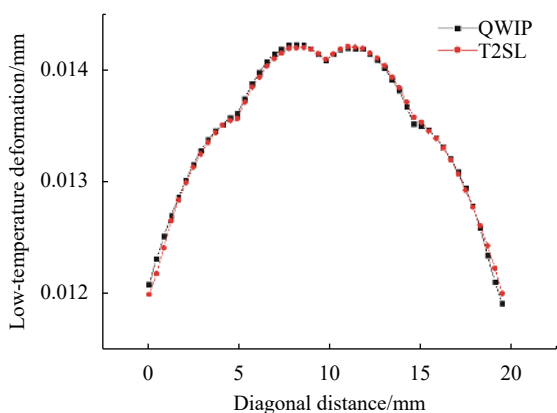


图 11 探测器对角线距离的低温形变

Fig.11 Low temperature deformation of detector diagonal distance

电等可靠性考核,芯片未发生热失配失效,且满足项目指标应用。

### 1.2.3 40 K 温区冷平台与制冷机高效热耦合

冷平台与制冷机耦合热层结构之间热阻不可忽视,通过对冷指顶端到探测器之间的热网络模型(如图 12 所示)进行分析,其热阻可分为界面材料热阻  $R_{ci}$  以及热层之间的接触热阻  $R_{ij}$ 。由于冷平台材料为高热导的钼,制冷机冷头材料为无氧铜,在 40 K 低温时其界面材料自身热阻  $R_{ci}$  可忽略不计。而界面热阻的材料多选用钢、银、耐低温胶、导热脂等材料,冷平台与制冷机冷指之间的热传导存在界面接触热阻。

接触热阻的试验公式给成  $P_n$  的函数形式,而将其他因素给成某种特定接触条件下的定系数形式<sup>[15]</sup>,即:

$$R_c = a + b \cdot /P_n \quad (2)$$

式中:  $R_c$  为单位面积接触热阻 ( $m^2 \cdot ^\circ C / W$ );  $P_n$  为单位面积上的正压力 (MPa);  $a$ 、 $b$  为待定系数,体现某特定接触条件下各种因素的综合影响。通过对接触热阻与正压力之间的公式 (2) 可知,提高正压力可以有效降低界面之间的接触热阻和减小界面之间的间隙,实现降低温度梯度。

界面热阻过大的原因主要有:一、各个界面以及界面填充材料本身存在界面热阻;二、界面和界面之间由于低温下冷缩量不同,导致低温件界面和界面之间存在间隙,从而导致界面和界面之间的正压力不足,进而导致接触热阻过大。杜瓦冷指与冷平台高效热耦合着重解决第二方面的问题,通过仿真分析低温下的冷缩量,计算出过盈耦合下最小的过盈量,通过增加过盈量的方法提高界面和界面之间的正压力,从而降低界面热阻,以实现冷平台和制冷机高效热耦合。

通过仿真分析发现,制冷机冷指和杜瓦芯柱之间在 40 K 深低温的环境下,冷缩量为 0.1 mm,即在 40 K 深低温环境下制冷机冷指和杜瓦芯柱之间有 0.1 mm 的间隙,需要过盈 0.1 mm 才能保证 40 K 低温下制冷机冷指冷头与杜瓦冷平台之间能够接触,同时为了降低冷头和冷平台之间的接触热阻,需要增加冷头和冷平台之间的过盈量以保证其低接触热阻,从而

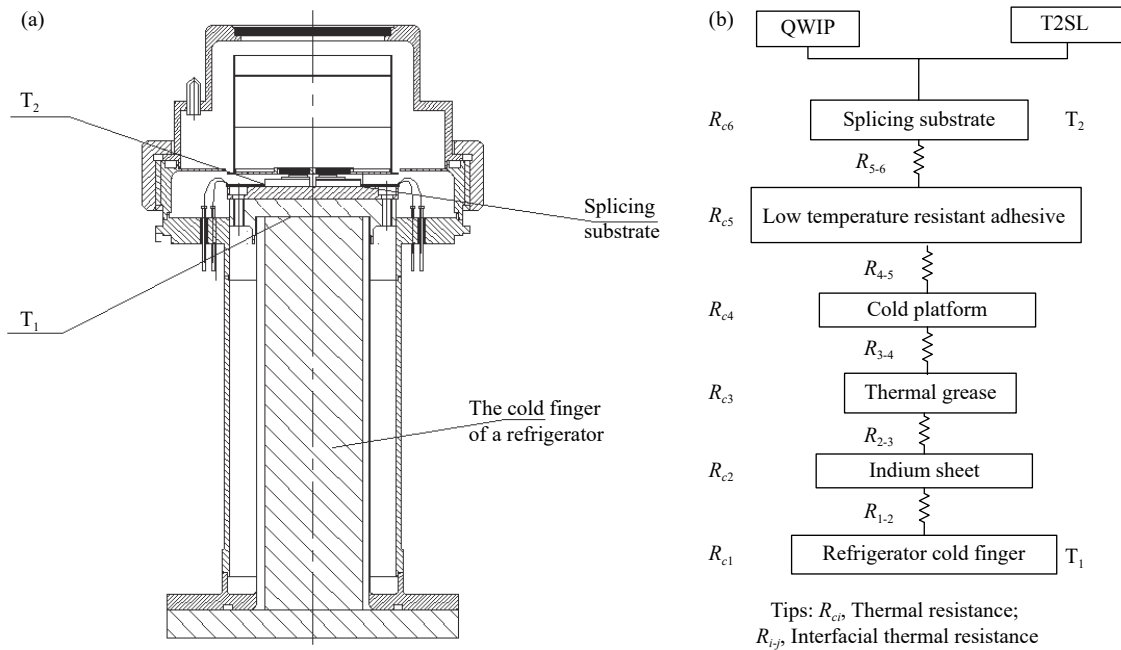


图 12 温度梯度验证原理及热网络模型。(a) 温度梯度验证原理; (b) 热网络模型

Fig.12 Temperature gradient verification principle and thermal network model. (a) Temperature gradient verification principle; (b) The figure of thermal network model

减小温度梯度。为了验证控制弹性冷头弹性力、过盈 0.05、0.1、0.2 mm 在不同情况下的温度梯度,文中进行了不同情况的试验对比。

文中通过在制冷机的冷指顶端贴装二极管,如图 13 所示,并在杜瓦内部拼接基板上上面贴装二极管和加热电阻,测试不同过盈量以及不同功耗下的温度梯度,同时与传统的弹性冷头耦合方式比较,以验证热层结构一的界面温度梯度。

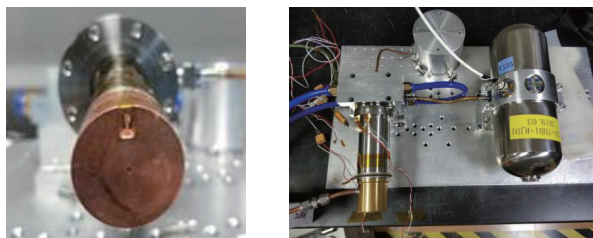


图 13 温度梯度验证试验

Fig.13 Temperature gradient verification test

试验发现:如图 14 所示,Mo 拼接基板热层结构 40 K 温区下过盈 0.2 mm 温度梯度最小,对比耦合力 5、20 N、过盈 0.05、0.1、0.2 mm 下的制冷机冷指与冷平台的温度梯度发现,随着过盈量逐渐增加的情况下,温度梯度逐渐减少,过盈 0.2 mm 下,钼拼接基板

的温度梯度最小。实验杜瓦的寄生热负载为 0.65 W,在钼基板上贴装加热电阻以不同的电流输入模拟探测器的发热量,探测器的焦耳热分别为 0、0.6、1 W,实测数据为 2.4 K@38 K@0 W、2.6 K@38 K@0.6 W、2.6 K@38 K@1 W。

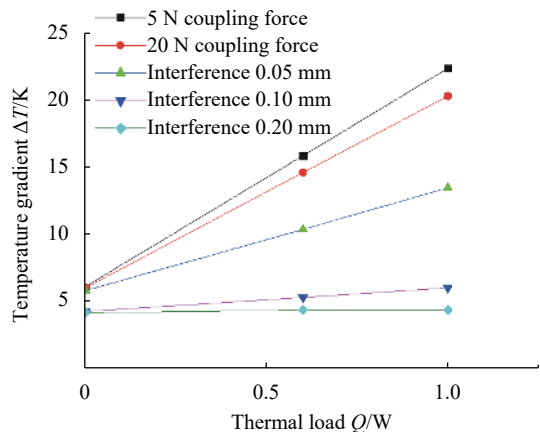


图 14 温度梯度验证试验

Fig.14 Temperature gradient verification test

### 1.2.4 低应力滤光片支撑结构设计

在长波波段,滤光片的膜层会较厚,比如 11.5~12.5 μm 带通滤光片,其滤光膜的厚度可达到 40 μm 以上。在探测器组件封装时,滤光片通常安装在特定



的支撑上后再加装在探测器前。随着长波或甚长波红外探测器的工程应用,相应的滤光片温度也降低到 40 K 左右。滤光片的低温应力显得重要。滤光片支架与滤光片通常采用耐低温胶粘接固定,靠近粘结位置的滤光膜不可避免的与耐低温胶接触,成为粘接面。滤光片本体与支架在材料的膨胀系数等属性上通常存在差异,降温后滤光片膜层不可避免的会承受热应力。试验表明这种热失配引起的应力会导致滤光片光谱特性的变化,从而引起光谱的变形,严重时会导致探测器组件的失效而不能使用<sup>[6]</sup>,必须要探索一种新方法来解决这一问题。

当温度达到 40~50 K,滤光片支架材料 4J29 和 4J42 与长波滤光片基体锗的膨胀系数差异较大,其滤光片支架材料 4J29 的平均热膨胀系数为 6.256 ppm/K

( $1 \text{ ppm}=10^{-6}$ )(300~45 K),而滤光片 Ge 的平均热膨胀系数为 3.6 ppm/K(300~45 K),通过对材料的低温属性调研发现,Mo 材料的平均热膨胀系数为 3.73 ppm/K(300~45 K),是理想的滤光片支架材料。

低温封装的长波滤光片支撑组件如图 15 所示,滤光片支架选用 Mo 材料,它包括带有防杂光的挡光环,滤光片在镀膜成型中通过金属掩模或者光刻技术在锗基片的四周预留非镀膜区。滤光片支架设置上视场光栏、胶接凸台,滤光片上的非镀膜区通过耐低温胶与滤光片支架的胶接凸台胶接,防杂光的挡光环通过低温胶与滤光片支架胶接,滤光片安装形成“抽屉”结构,以防滤光片边缘和上下面无膜区的杂光对探测器的影响。

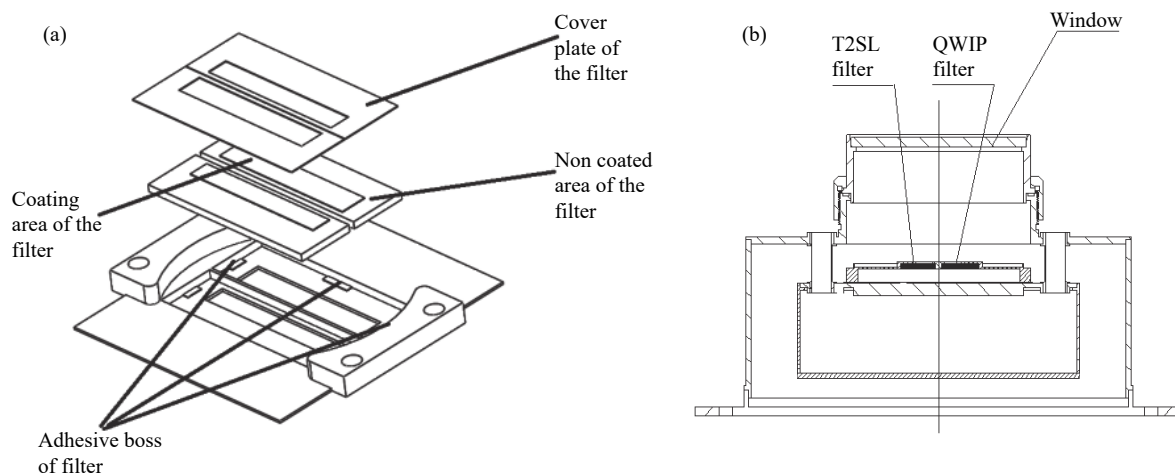


图 15 滤光片支架支撑结构及滤光片低温形变测试。(a) 滤光片支架支撑结构;(b) 滤光片低温形变测试

Fig.15 Filter holder support structure and low temperature deformation test of filter. (a) Filter holder support structure; (b) Low temperature deformation testing device for optical filters

对采用该结构胶接的滤光片支撑组件进行仿真分析和低温形变测试,经过仿真分析发现,对比 4J29 材料的滤光片支架,采用 Mo 材料支撑的滤光片低温下的等效应力仅为 11.78 MPa,采用 4J29 材料支撑的滤光片低温下的等效应力为 29.43 MPa,Mo 材料和滤光片具有更好的热匹配。经过专用低温测试装置,测试滤光片低温下的形变,QWIP 和 T2SL 在 77 K 下的形变量分别为 0.008 55、0.005 98 mm 左右,并进行了液氮-室温以及 40~300 K 的高低温冲击试验,滤光片未发生脱膜以及裂片等问题。

## 2 产品及主要性能指标

文中重点突破了探测器的三维拼接、40 K 温区高效热传输且与探测器低应力集成的热层结构、低应力滤光片支撑、杜瓦与制冷机耦合等关键技术,成功获得了双波段红外探测器杜瓦冷箱组件。性能指标如表 3 所示,通过各项环境适应性试验。经过 2000 h 通电老练和 300 次开关机试验验证,探测器温度产品性能稳定,各项性能实测值均满足要求,杜瓦实物如图 16 所示。

表 3 红外焦平面杜瓦的主要性能指标

Tab.3 Main performance indexes of IRFPA

Item	Value
Temperature/K	LW1:50
	LW2:40
Wave band	LW1:T2SL(4.93-7.21 μm)QWIP(8.97-10.45 μm)
	LW2:T2SL(7.01-9.21 μm)QWIP(10.25-12.53 μm)
Temperature difference/K	±0.4
Pixed number	QWIP:320×64
	T2SL:320×64
Pixel size/μm	60×60
Packaging	Dewar
Operative pixel percent	99.5%
Response inhomogeneity	10%
Maximum size/mm	Φ76×131
Adapter cooler	Special
Heat load/mW	492
Assembly mass/g	521.1



图 16 杜瓦组件照片

Fig.16 Photo of Dewar

### 3 结 论

红外探测器杜瓦冷箱在封闭式冷光学系统中发

挥了重要作用。文中针对高光谱探测中的冷光学系统的低背景辐射、低器件暗电流的要求,提出了一套 40 K 的双波段红外探测器杜瓦冷箱组件。杜瓦采用无窗口设计以降低窗口和窗口帽背景噪声,采用波纹管与冷箱耦合集成封装,同时将量子阱探测器和 II 类超晶格探测器集成封装在一个拼接基板上。器件工作 40 K 温区以降低器件暗电流,对 40 K 双波段红外探测器的三维调节以及低温配准评价、高效低应力热层结构设计、低热阻耦合方式、低应力滤光片支撑结构的关键技术进行攻关。实现了 40 K 温区下两个 320×64 探测器拼接平面度 ±2.06 μm(RMS)、T2SL、QWIP 红外焦平面探测器的低温应力为 19.897 MPa 和 22.059 MPa、过盈耦合下 2.6 K 的温度梯度、高可靠的 40 K 温区滤光片支撑结构。并对红外探测器杜瓦进行了鉴定级力学、热真空、200 次高低温循环(273~40 K,降温速率为 10 K/min)、2 200 h 通电工作(40 K 工作)、大于 300 次的开关机、35 000 h 通电工作等一系列严格的空间环境适应性考核。40 K 温区双波段红外焦平面探测器杜瓦冷箱的成功研制对于我国天基红外遥感的冷光学系统的发展具有一定的推动意义。

### 参考文献:

- [1] Li Chunlai, Liu Chengyu, Jin Jian, et al. Development of infrared hyperspectral remote sensing imaging and application of gas detection (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20210866. (in Chinese)
- [2] Liu Enguang. Research on key technologies of cryogenic integration of cold optical system [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- [3] Chen Junlin, Wang Xiaokun, Zeng Zhijiang, et al. Study on thermal characteristics of Dewar's flexible shell structure for cryogenic optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 20220180. (in Chinese)
- [4] Liu Dafu, Xu Qinfei, Wang Yang, et al. Multi-band infrared detector assemblies and performances for 2nd-generation GEO meteorological satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404007. (in Chinese)
- [5] Zeng Zhijiang, Yang Liyi, Hao Zhenyi, et al. Dewar assembly integrated with cryogenic optics for dual band IR detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1810002. (in Chinese)

- [6] Huang Zhiguo. Research on space target of ground-based infrared detection technology [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- [7] Li Ning, Guo Fangmin, Xiong Dayuan, et al. 256×1 very long wavelength QWIP FPAs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 50(6): 756-758. (in Chinese)
- [8] Huang Min. Studies on novel In As/Ga As Sb type-II superlattice long wavelength infrared photodetectors [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [9] Jhabvala M, Reuter D, Choi K, et al. Performance of the QWIP focal plane arrays for NASA's landsat data continuity mission[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2011, 8012: 80120Q.
- [10] Xu Qinfei. Study on assembly of near-room temperature focal plane detectors[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [11] Xiong Dayuan, Li Ning, Xu Wenlan, et al. Study of the dark current in very long wavelength quantum well infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(9): 5424 (in Chinese)
- [12] Chen Junlin, Wang Xiaokun, Zhu Haiyong, 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. (in Chinese)
- [13] Jin Chuan. Study on antimony-based compound semiconductor superlattice infrared photodetectors[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017. (in Chinese)
- [14] Sun Quan, Mo Defeng, Liu Dafu, et al. Research on the package structure of deep low-temperature and high-power resistor array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210721. (in Chinese)
- [15] Zhao Honglin, Huang Yumei, Xu Jielan, et al. Experiment research on thermal contact resistance of normal used joints [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 1999(3): 26-29. (in Chinese)
- [16] Xie Ping. Investigation on the growth, properties and applications of  $Pb_{1-x}Ge_xTe$ , an infrared high-index coating materials[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)

## Research on packaging technology for 40 K dual-band long-wave detectors

Wang Xiaokun<sup>1,2</sup>, Chen Junlin<sup>1,2</sup>, Luo Shaobo<sup>1,2</sup>, Zeng Zhijiang<sup>1,2</sup>, Li Xue<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

### Abstract:

**Objective** Cryogenic optical technology is a crucial support technology for weak target and multispectral infrared detection. In order to achieve precise temperature control and prevent contamination in the cryogenic optical system, it is common to integrate the cryogenic optics with the detectors inside a cryocooler.

**Methods** A specific hyperspectral camera requires the integration of a 320×64 quantum well detector and a 320×64 type II superlattice, co-planarly assembled with dual-band micro-filters to create a long-wave dual-band detection dewar assembly. The required operating temperature for the detector is 40 K, and it is achieved using a pulse tube cryocooler. The dewar adopts a windowless design and is integrated with the cryogenic optical system cryocooler using flexible bellows for hermetic sealing and precise alignment adjustments.

**Results and Discussions** Addressing the challenges of three-dimensional assembly of the dual-band detector at

40 K, low-stress assembly of the detector and filters, and efficient heat transfer between the cryocooler and detector, this study investigates the three-dimensional assembly of the detector (Fig.4-6), a heat layer structure for efficient heat transfer at 40 K with low-stress integration with the detector (Fig.7), low-stress filter support (Fig.15), and the coupling between the dewar and the cryocooler (Fig.12). Innovative approaches such as a three-point Z-axis adjustment assembly method, an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  carrier composite molybdenum substrate for the detector, a molybdenum support structure for the integrated dual-band filters, and a coupling method with stress isolation for the cryocooler and detector are proposed.

**Conclusions** Ultimately, this research achieves a detector flatness better than  $\pm 2.06 \mu\text{m}$  (RMS) at 40 K (Fig.6), low-temperature stress of the detector less than 22.06 MPa (Fig.8), low-temperature deformation of the dual-band filter membrane less than  $8.55 \mu\text{m}$ , and a temperature gradient of 2.6 K (Fig.14) between the detector and the cryocooler. The dewar assembly with a 40 K long-wave dual-band infrared detector has been verified through 2000 hours of continuous operation and 300-on/off cycles, with no significant change in component performance before and after testing, meeting the requirements for engineering applications (Fig.16).

**Key words:** Dewar; cryogenic optical; quantum well infrared detector; type II superlattice infrared detector; 40 K temperature zone