

文章编号: 1672-8785(2024)05-0018-05

深低温工作甚长波面阵红外 探测器封装技术

方志浩 付志凯 王 冠 张 磊

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 基于甚长波红外探测器对低于液氮温度工作环境的需求, 提出了一种深低温工作甚长波红外探测器封装技术。通过对杜瓦组件漏热和芯片电学引出结构的优化设计, 可控制芯片在 30 K 低温工作时整个杜瓦组件的静态热耗为 0.65 W, 最冷端位置的静态热耗为 0.3 W, 与之适配的两级脉管制冷机冷量可以满足上述热耗需求。完成了探测器组件的封装测试。结果表明, 在制冷机膨胀机热端空气冷却测试条件下, 探测器芯片部分可达到 35 K 的温度; 杜瓦的外轮廓小于 $\Phi 130\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 。该项技术成果促进了深低温工作的甚长波面阵红外探测器封装技术的发展。

关键词: 超低温; 甚长波红外探测器; 封装技术

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.05.002

Packaging Technology for Very Long Wave Array Infrared Detectors Working at Deep Low Temperature

FANG Zhi-hao, FU Zhi-kai, WANG Guan, ZHANG Lei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Based on the demand of working environments below liquid nitrogen temperature for very long wave infrared detectors, a kind of packaging technology for very long wave infrared detectors working at deep low temperature is proposed. Through innovative optimization design of the heat leakage and the chip electrical lead structure of the dewar, the static thermal load of the entire dewar can be controlled to be 0.65 W when the chip operates at a low temperature of 30 K, and the static thermal load at the coldest end position is 0.3 W. The cooling capacity of the two-stage pulse tube refrigerator that is compatible with the dewar can meet the above thermal load requirements. The packaging test of the detector component is completed. The results show that under the air cooling test condition of the refrigerator expander's hot end, the detector chip can reach the temperature of 35 K, and the outer contour of the dewar is smaller than $\Phi 130\text{ mm} \times 180\text{ mm}$. This technological achievement has promoted the progress of packaging technology for very long wave array infrared detectors operating at deep low temperature.

Key words: ultra-low temperature; very long wave infrared detector; packaging technology

收稿日期: 2023-08-07

作者简介: 方志浩(1994-), 男, 山西忻州人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事红外探测器结构设计仿真工作。E-mail: f_zhi_hao@163.com

0 引言

宇宙中大多数天体的温度很低, 有的表面温度只有数十开尔文, 甚至几开尔文。而黑体辐射峰值波长随温度降低向长波方向红移, 5800 K 时峰值波长位置在 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右, 100 K 时在 $30\ \mu\text{m}$ 附近。这使观察这些天体目标的红外探测器的截止波长甚至达到几百微米。图 1 展示了宇宙背景探测者卫星 (Cosmic Background Explorer, COBE) 的太空运行图以及它在长波/甚长波波段获得的太空假彩色图^[1-6]。

碲镉汞 (Mercury Cadmium Telluride, MC-T)、阻挡杂质带 (Blocked Impurity Band, BIB) 等甚长波红外探测器的可探测波长覆盖 $5\sim 300\ \mu\text{m}$, 可以不受星际尘埃阻挡而实现超远距离低温物体的探测, 被用于各种大型天基探测平台, 大大提高了人类探测未知宇宙的能力。但甚长波红外光子能量更小, 相应的红外探测材料带隙更窄, 探测器的噪声电流更难抑制, 因此需要工作在更低的温度 (如 60 K、40 K、20 K 甚至 2 K 等)。表 1 展示了常用红外天文探测器的探测波长范围和工作温度^[3-6]。

低温制冷机是指能够在 120 K (或 -153.15°C) 以下温区获取有效制冷量的制冷

设备, 其主要作用是为红外探测器芯片提供所需的低温工作环境。目前报道的面阵红外探测器封装结构可实现的工作温度通常为 80 K, 部分可以实现 60 K 正常工作。但是针对更低工作温度 (如 40 K、30 K、20 K 等) 的面阵红外探测器封装技术并无详细报道。

本文以封装甚长波波段工作的 320×256 ($30\ \mu\text{m}$) 碲镉汞红外芯片为例, 配合两级脉管制冷机对杜瓦封装结构技术进行创新优化设计, 以解决电学引出、组件热耗等关键技术难点, 从而实现甚长波器件要求的 30 K 深低温工作。这对深空探测用红外探测器封装技术的发展具有推动作用。

1 杜瓦组件低漏热设计

为达到 30 K 的工作温度, 本文选用两级脉管制冷机: 第一级冷端设计温度为 120 K, 第二级冷端 (最冷端) 设计温度为 30 K。在常温工作环境下, 制冷机可以提供的总冷量为 1.5 W, 30 K 最冷端可以提供 0.5 W 的冷量。

该碲镉汞芯片预期的工作温度远低于常规的液氮温区, 将达到 30 K。从室温端到 30 K 深低温冷头存在近 270 K 的温差。巨大的温度梯度必然会引起各种形式的热损失 (或称为漏

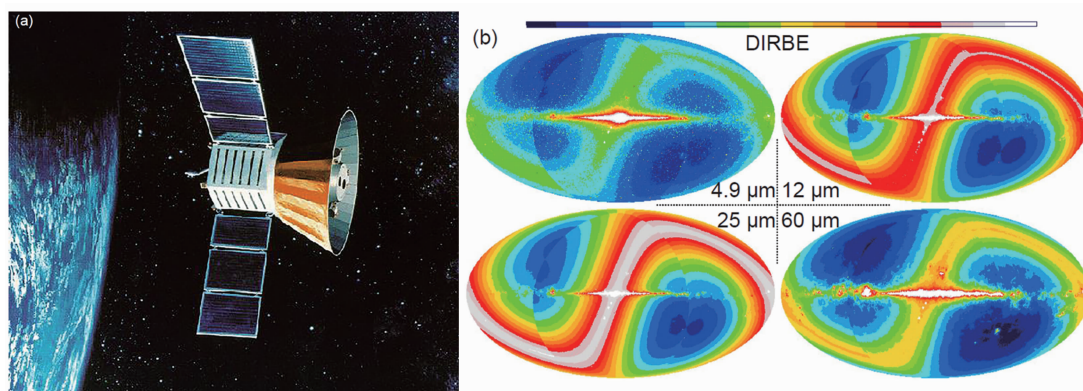


图 1 (a) COBE 卫星的太空运行示意图; (b) 该卫星在 $4.9\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 和 $60\ \mu\text{m}$ 四个波段获得的天空假彩色图^[1]

表 1 部分波段探测器类型及其所需的工作温度^[1]

辐射类型	波长/ μm	黑体温度/K	探测器类型	工作温度/K
甚长波	15	200	HgCdTe	35~60
甚长波	20	150	Si:As	7~10
甚长波	50	60	Ge:Ga	2
甚长波/微米波	100	30	Ge:Ga	1.5

热损失),从而导致探测器芯片很难达到要求的工作温度。

探测器杜瓦工作时内部处于真空状态,故杜瓦的漏热主要由冷端与热端之间的传导漏热和辐射漏热构成。我们基于上述两方面的漏热,通过结构设计优化尽可能降低传导漏热和辐射漏热,从而达到减小整机热耗的目的。

1.1 杜瓦辐射漏热设计

两级制冷机结构如图 2 中的浅蓝色区域所示。它由室温热端、120 K 一级冷端和 30 K 二级冷端部件构成,杜瓦最外边为室温外壳。随着结构尺寸的增加,热端与冷端之间的热辐射成为主要的漏热源之一。两物体之间的辐射传热通量为

$$\Phi = \sigma \cdot \frac{1}{\frac{1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

式中, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, ϵ 为辐射体的发射率, A 为辐射体的表面积, T_2 为高温物体温度, T_1 为低温物体温度, A_1 表示面积较小的物体的表面积。为减小辐射系数,零件表面采用抛光工艺进行处理,镀镍样品的平均发射率为 0.08,镀金样品的平均发射率为 0.05。

杜瓦封装壳体设计有两种方案(见图 2)。在单层方案中,最冷端 30 K 结构直接与常温外壳进行热辐射交换,温度梯度大,辐射漏热严重。双层隔热方案是在 120 K 冷平台上加装一层隔热层,当制冷机工作时将该隔热层制冷到 120 K 温度,外壳与最冷端 30 K 结构之间的辐射热交换变为 120 K 隔热层与常温外壳之间的辐射热交换,最冷端 30 K 结构只与 120 K 隔热层之间辐射。这将大大降低最冷端的辐射漏热,对最冷端的冷量需求显著减小。经过计算,两种状态下最冷端的辐射漏热如表 2 所示。可以看出,采用双层隔热结构方案可使最冷端的辐射漏热计算值从 261 mW 下降到 188 mW,降幅约为 28%。

1.2 杜瓦传导漏热设计

在封装深低温 30 K 工作的甚长波红外探测器时,芯片电信号的引出方式将对漏热产生极大的影响,上述两种封装方案将直接影响最冷端芯片的电学管脚引出形式。单层隔热方案中,芯片的电学引出将利用聚酰亚胺电学柔带直接连接 30 K 冷头和常温的外壳插件,传热温差接近 270 K。第二种双层隔热层设计可以

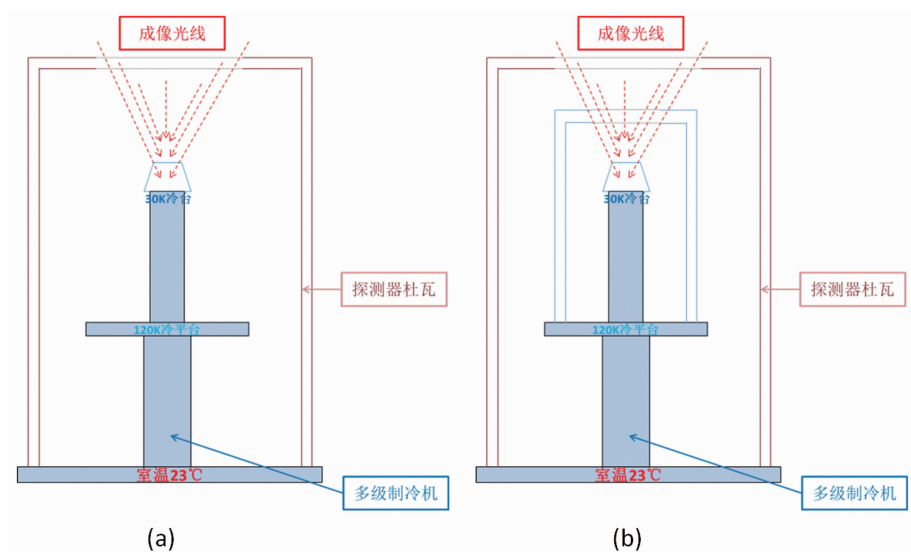


图 2 (a)单层隔热方案的原理示意图; (b)双层隔热方案的原理示意图

表 2 两种封装方案的最冷端辐射漏热对比

	单层隔热层设计	双层隔热层设计
辐射漏热/mW	261	188

在 120 K 的隔热层顶部设计柔带安装平台, 将柔带贴装到该平台上。此时柔带与常温外壳之间的温差仅为 180 K, 而芯片则通过低漏热的键合丝连接到柔带的焊盘上, 最冷端 30 K 到 120 K 平台的温差仅为 90 K。通过创新的电学引出方案, 可以有效降低最冷端的电学传导漏热, 有利于芯片顺利到达预设工作温度。具体的电学引出方式如图 3 所示, 本芯片共引出 37 个管脚。

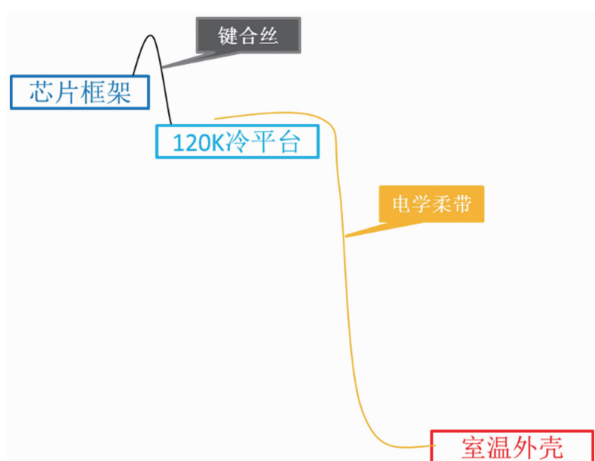


图 3 电学引出模式

利用式(2)计算两种封装方案的最冷端电学传导漏热(结果见表 3)。

$$Q_{CFR} = A \cdot \frac{\int_{T_1}^{T_2} k dT}{L} \quad (2)$$

式中, L 为传热长度(cm), A 为垂直于热流方向的传热面积(cm^2), T_1 为冷端温度(K), T_2 为热端温度(K), $\int k dT$ 为相对温度的积分导热率(W/cm)。

我们根据上述公式进行两种封装方案的最冷端传导漏热设计值对比。单层隔热层方案的最冷端传导漏热计算值为 430 mW; 双层隔热层方案的最冷端传导漏热计算值为 119 mW, 降低了近 70%。

表 3 两种封装方案的最冷端电学传导漏热对比

	单层隔热层设计	双层隔热层设计
最冷端传导漏热/mW	430	119

1.3 小结

通过对上述传导漏热和辐射漏热两方面的优化设计及计算结果对比可知, 针对两级脉管制冷机采用双层隔热的电学引出设计方案可大大降低最冷端探测器安装平台的静态热耗, 减小对制冷机的冷量需求, 有利于制冷机的小型化和低功耗设计。最终设计方案中制冷机冷量和杜瓦静态热耗的计算值如表 4 所示。可以看出, 本制冷机的冷量可以满足优化热学设计后的探测器杜瓦组件。

表 4 杜瓦静态热耗和制冷机冷量参数对比

杜瓦总静态热耗	650 mW
制冷机总冷量	1000 mW
最冷端静态热耗	307 mW
最冷端制冷机冷量	500 mW
制冷机冷量是否满足需求	是

2 组件封装及测试结果

基于上述设计方案, 我们完成了光机电零部件的加工、检验、预处理和组件封装(适配两级脉管制冷机)。封装完成的组件如图 5 所示, 杜瓦轮廓小于 $\Phi 130 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$, 组件封装工艺合理可行。经过开机测试, 搭载的 320×256 ($30 \mu\text{m}$) 芯片可以达到 35 K 工作温度, 距离本组件预设的工作温度有 5 K 的差距。经分析认为, 该制冷机在全功率工作时, 探测器杜瓦热端(即制冷机的膨胀机)温度过高。经过外接热电偶实测, 杜瓦热端的温度约为 80°C 。这将降低制冷机的工作效率, 同时增加杜瓦组件的静态热耗。杜瓦热端散热能力欠缺是导致本组件芯片温度未达到 30 K 的主要原因。

针对上述杜瓦热端温度高的问题, 后续该组件需要进一步优化制冷机膨胀机端的散热工装, 利用贴合面积更大的水冷散热模块快速降低制冷机发热, 从而保证探测器杜瓦环境温度在 23°C 附近, 使组件内部芯片可以达到 30 K 的工作温度。本探测器组件试验封装的是性能极差的芯片, 故有关的光电探测性能不具备呈现和讨论的价值, 不在本文中进行阐述。

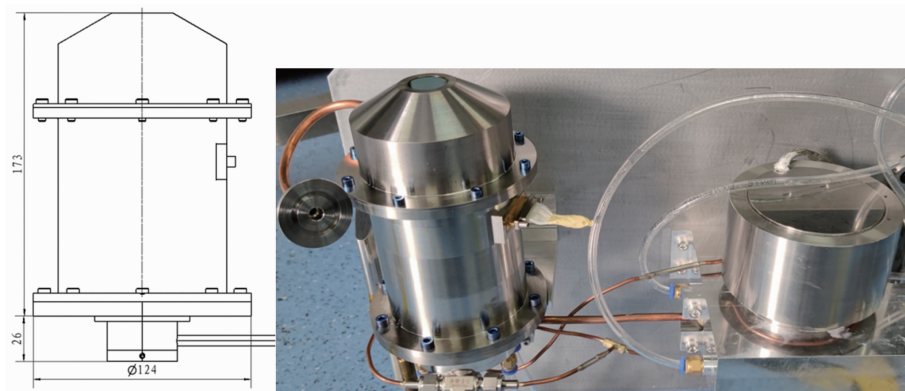


图 4 杜瓦包络尺寸及整机组件实物照片

3 结束语

本文描述了一种搭载深低温工作的甚长波探测器芯片的封装结构。以封装 320×256 ($30 \mu\text{m}$) 碲镉汞芯片为例,进行了产品的热设计及封装测试。结果表明,整个杜瓦部分的外轮廓小于 $\Phi 130 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$,该组件理论设计的芯片工作温度为 30 K ,但实测结果仅到 35 K 。经过分析测试,我们认为制冷机膨胀机端的散热装置设计不合理,导致制冷机工作过程中杜瓦热端一直处于 80°C 的高温状态,造成杜瓦静态热耗增大,制冷机无法将芯片制冷至 30 K 。本组件的双层隔热双级制冷的设计方式促进了深低温工作的甚长波红外探测器封装技术的进步,但基于现有的测试结果认为,该类组件的后续优化需要重点考虑膨胀机端的散热设计,使探测器组件可以工作在常温环境下。

参考文献

- [1] 戴宁. 甚长波红外光电探测材料和器件专题·编者按 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, **51**(2): 1.
- [2] 张燕, 李向阳. 航天红外遥感探测器发展现状 [C]. 上海: 上海市红外与遥感学会第十九届学术年会, 2014.
- [3] 田震, 宋淑芳, 邢艳蕾, 等. 甚长波碲镉汞红外探测器制备研究 [J]. 激光与红外, 2022, **52**(10): 1527–1531.
- [4] 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): 7.
- [5] 李庆. 长波碲镉汞红外焦平面探测器暗电流机理分析 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
- [6] 潘昌翊. 锗基阻挡杂质带红外探测器及其光电性质研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2021.
- [7] Zhu H, Weng Z, Zhu J, et al. Surface Plasmon Enhanced Si-based BIB Terahertz Detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**(5): 053505.
- [8] 郭元东, 周强, 刘欣彤, 等. 35 K 深低温制冷与热传输集成系统研究 [J]. 真空与低温, 2022, **28**(3): 353–358.
- [9] 刘洋. 航天直线斯特林制冷机驱动控制技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- [10] 吴亦农, 张安阔, 蒋珍华, 等. 上海技物所机械制冷机进展 [C]. 上海: 上海市制冷学会 2015 年学术年会, 2015.
- [11] 张安阔, 刘少帅, 朱海峰, 等. 空间用 $3 \text{ W}@80 \text{ K}$ 脉冲管制冷机实验研究 [J]. 低温工程, 2016, **37**(5): 4.
- [12] 曹溶菲. 空间用液氢温区两级斯特林脉管制冷机理论设计与实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [13] 孙闻. 制冷型红外探测器组件低温热特性研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.