

文章编号: 1672-8785(2020)09-0015-05

红外探测器杜瓦的小型化设计方法

张 磊 王 冠 付志凯

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 杜瓦小型化是制冷型红外探测器组件的发展方向之一, 也是未来红外成像系统小型化、集成化发展的需要。由于杜瓦为探测器组件提供光、机、电接口, 其小型化设计要综合考虑制冷机的制冷能力、探测性能、真空性能和系统应用等多方面因素。结合杜瓦的结构组成和工作原理, 分析了小型化设计的方法及影响。该研究对杜瓦设计有较好的启发和指导作用。

关键词: 红外探测器; 杜瓦; 小型化

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.09.002

Compact Design Method of Infrared Detector Dewar

ZHANG Lei, WANG Guan, FU Zhi-kai

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

Abstract: Compact Dewar is not only one of the development directions of cooled infrared detector assembly but also the need for miniaturization and integration of future infrared imaging system. Dewar provides optical, mechanical and electrical interfaces for the detector assembly, so its compact design requires comprehensive consideration of refrigeration capacity, detection performance, vacuum performance and system application. Combined with the structure composition and working principle of Dewar, the method and influence of compact design are analyzed. The research has a better inspiration and guidance for the design of the Dewar.

Key words: infrared detector; dewar; compact

0 引言

红外探测器技术具有被动探测、探测精度高、环境适应性强的特点, 广泛应用于预警探测、情报侦察、精确打击、夜视和天文观测等领域^[1]。近年来, 无人机、微纳卫星、小型导引头等多种微小型搭载平台快速发展, 对红外探测器组件等平台载荷的体积、重量和功耗提出了苛刻的要求。

杜瓦是制冷型红外探测器芯片的封装载体, 用于提供红外探测器组件的光学、电学和机械接口。近年来, 大面阵、长行列、双/多色、数字化红外探测器技术不断发展, 杜瓦的尺寸和复杂程度也逐步增加。与此同时, 随着应用范围的不断扩大, 整机需要探测器拥有更长的真空寿命、更小的体积和更高的力学可靠性。杜瓦的小型化设计要综合考虑制冷机的制

收稿日期: 2020-07-11

作者简介: 张磊(1986-), 男, 山东东阿人, 高级工程师, 主要从事红外探测器封装技术研究。

E-mail: leizh1210@163.com

冷能力、探测性能、真空性能和系统应用等多方面因素。

1 杜瓦组成及原理

图 1 为 320×256 中波红外探测器杜瓦结构的剖面视图。从功能分类上来看,杜瓦主要包括四部分:一是制冷接口模块,由冷指与冷台构成。作为与制冷机的耦合接口,它承载探测器芯片和冷屏等冷头结构,将制冷机的冷量传递到探测器芯片,使其降低至工作温度。二是电学引出模块,由引线环和框架构成。其中,引线环是探测器组件与外部处理电路之间的电学接口,框架是探测器芯片的承载结构和电学过渡结构。三是光学接口模块,包括冷屏、低温滤光片和窗片。其中,冷屏的作用是限制光学视场,屏蔽杂散辐射;低温滤光片和窗片的作用是组合实现规定的光谱透过范围。四是真空保持模块,包括构成真空壳体的外壳、窗座等零件,排气管,用于吸收内部放气并维持杜瓦内部高真空的吸气剂以及支撑结构(支撑杆等)。

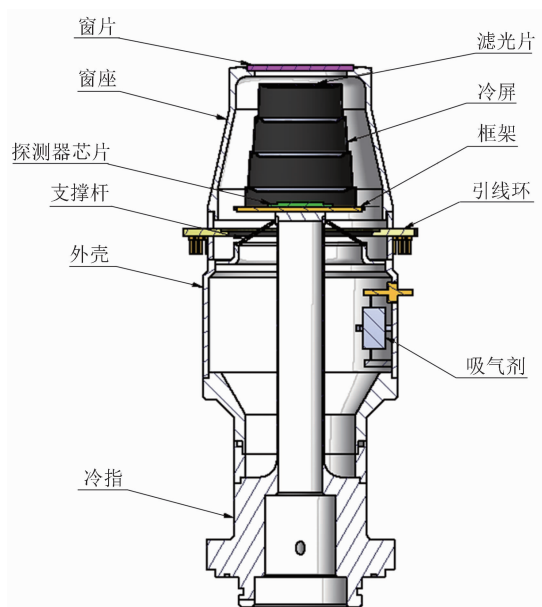


图 1 杜瓦结构组成图

经结构制作、芯片装配及真空排气工艺后,杜瓦内部形成高真空,冷端与外壳之间的对流换热被隔绝。杜瓦冷指与制冷机耦合,把制冷机产生的冷量传递给探测器芯片,将芯片

降至 77 K 工作温度。外部处理电路通过电学引出模块给探测器芯片上电。然后探测器芯片将透过光学接口模块的红外辐射信号转换成电信号,再通过电学引出模块输出。经外部处理电路处理后,以符合人眼视觉的红外图像显示出来。

2 杜瓦结构的小型化设计

杜瓦结构的小型化设计在保证杜瓦功能、性能和可靠性的前提下,可通过对制冷接口、电学接口、光学接口、真空保持等各个功能模块的结构和装配工艺进行优化来实现。

2.1 冷指设计

冷指是杜瓦与制冷机的耦合接口。从图 1 中可以看出,在组件的光学尺寸一定的情况下,冷指基本决定了杜瓦的轴向尺寸。一般将冷指设计为薄壁、悬臂结构,并选用导热率低的钛合金材料,这是因为由冷指引起的传导漏热占杜瓦漏热的近 60%。冷指的小型化设计可以从以下两方面加以考虑:(1)减小尺寸,匹配小型化制冷机。这类组件一般具有读出电路功耗低、芯片能在高温下工作以及可手持使用等特点。比如图 2 中 Sofradir 公司生产的 EPSILON 组件(耦合 Thales RM1 制冷机)的重量只有不到 320 g,工作温度为 100~110 K。(2)采用 J-T 制冷形式。与斯特林制冷机相比,J-T 制冷器具有制冷速度快、体积小的优势。尤其是锥形制冷器和平板制冷器,可以大大减小杜瓦尺寸。如图 3 所示, Sofradir 公司采用平板制冷器制备的 64×1 探测器的最大尺寸不超过 35 mm^[2]。该组件为非真空结构,杜瓦内充氦气。但是 J-T 制冷器的制冷温度单一且稳定性稍差,一般不适用于甚长波组件。

2.2 引线环设计

引线环是杜瓦的电学接口,其内部通过引线读出电路芯片键合连通,外部与系统处理电路连接。目前,比较成熟的引线环主要采用高温共烧陶瓷环焊接金属环的形式,比如图 1 中的 54Pin 引线环。这种结构的制备工艺简单、成本低,在国内外红外焦平面探测器组件



图 2 Sofradir 公司的 EPSILON(MW384×288)组件上被广泛应用。但随着芯片规模的增大和管脚数量的增加, 引线环的尺寸也不断增大。为了减小杜瓦的体积, 可以采用以下几种方式: (1)根据芯片类型, 将陶瓷环设计成椭圆形或多边形, 减小无用尺寸, 从而缩减杜瓦的外径尺寸。图 4 中 Sofradir 公司生产的 SATURN 组件和 Selex 公司生产的 Hawk 组件就是采用这种设计。(2)将连接器作为引线环的外部接口。连接器技术成熟、占用空间小, 接口标准化, 便于整机系统应用。图 5 中 Sofradir 公司生产的 Altair 组件就采用了 2 个 21Pin 连接器。其次, 陶瓷环受制于制备工艺, 不能无限做大; 当封装大面阵芯片时, 就无法使用。而采用连接器形式的引线结构则能做成标准模块, 可根据需要灵活选择模块数量。例如, 华北

光电技术研究所研制的 $2.7k \times 2.7k$ 中波组件就采用了 1 个 51Pin 连接器。(3)优化杜瓦的电学衬底设计, 采用 HTCC 和 LTCC 等多层共烧陶瓷工艺, 减小框架尺寸。尤其是对于读出电路的引出管脚多、分布不均匀的情况, 可通过多层陶瓷工艺优化管脚排布。

2.3 吸气剂设计

在杜瓦真空腔室内放置吸气剂, 用于吸收内部放气, 维持杜瓦的真空寿命。目前, 常用的吸气剂类型和使用方式如图 1 所示, 即通过抱紧结构将柱状吸气剂焊接在杜瓦外壳上。这也是影响杜瓦径向尺寸的主要因素。为了减小吸气剂所占的空间, 一种方法是优化吸气剂的安装方式。例如, RVS 公司的 $2k \times 2k$ 组件和 AIM 公司的 640×512 中波组件(见图 6)将吸气剂作为一个部件连接在外壳上。还有的组件将吸气剂安装在窗座上, 有效减小了外壳部分的体积。这种方案适用于小型杜瓦结构。另外, 改进吸气剂结构也是一个优化方向。Sofradir 公司生产的 JUPITER 组件(见图 7)采用了一种环状吸气剂设计, 其吸气能力是柱状吸气的 4 倍, 而且减少了一个绝缘子的焊接并减小了焊接工艺风险。另外, 这种吸气剂可根据组件的真空体积来设计适合的尺寸, 从而减小占用空间^[3]。

2.4 集成化设计

探测器芯片、读出电路以及整机的应用方

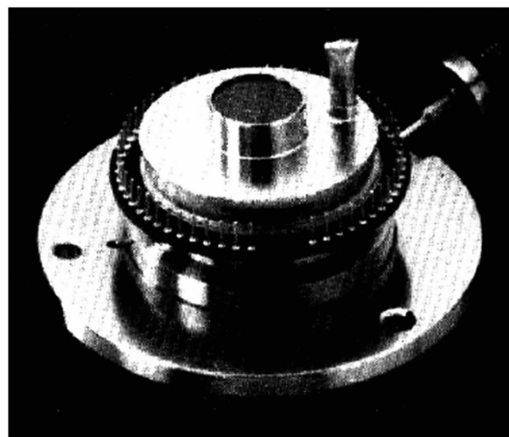
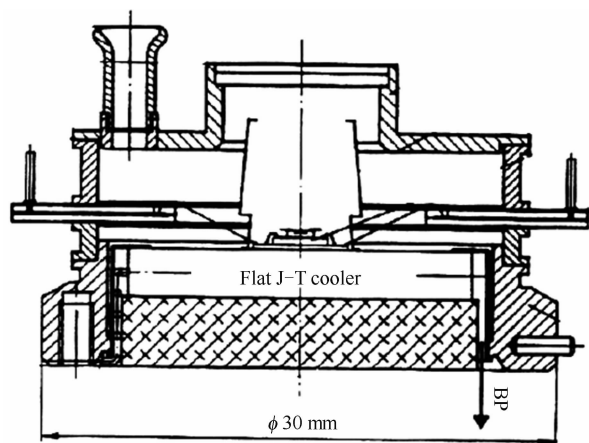


图 3 Sofradir 公司生产的 64×1 组件



图 4 异形陶瓷环引线结构

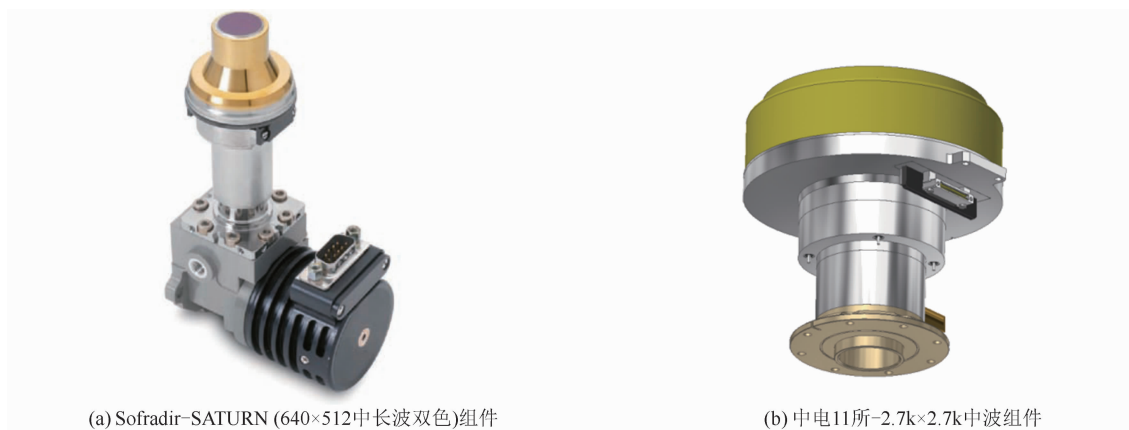


图 5 接插件式引线结构

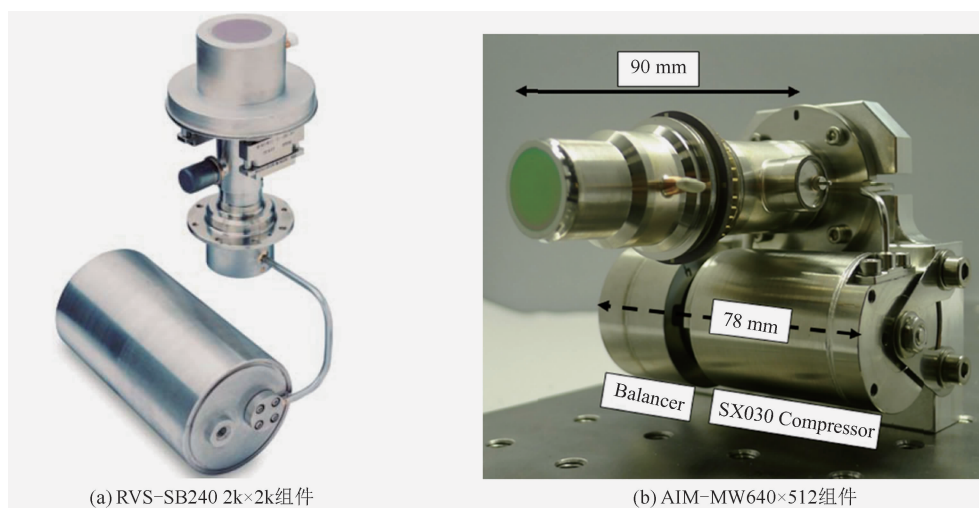


图 6 吸气剂安装方式的示意图

式同样会影响杜瓦体积。例如，通过减小探测器芯片的像元中心距可缩小芯片尺寸。华北光电技术研究所的小型化 $1\text{k} \times 1\text{k}$ 中波组件将像元中心距由 $15\text{ }\mu\text{m}$ 缩小到 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，从而实现了小型化封装^[4]。通过提高芯片的工作温度可减

小对制冷机冷量的需求。图 6(b)所示的 640×512 中波组件的工作温度达到 140 K ，且在耦合 SX030 小型制冷机后，总重量不到 560 g 。通过简化读出电路的输出管脚，可以减小引线环的尺寸。图 2 所示的 EPSILON 组件只有 1

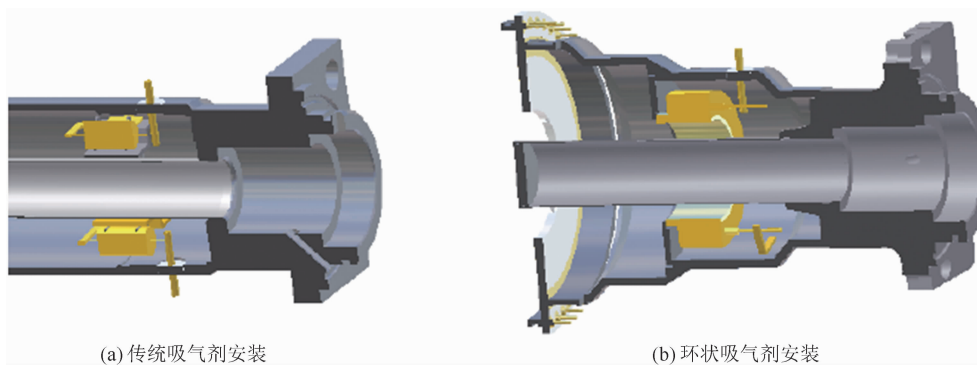


图 7 Sofradir-JUPITER(1280×1024)组件

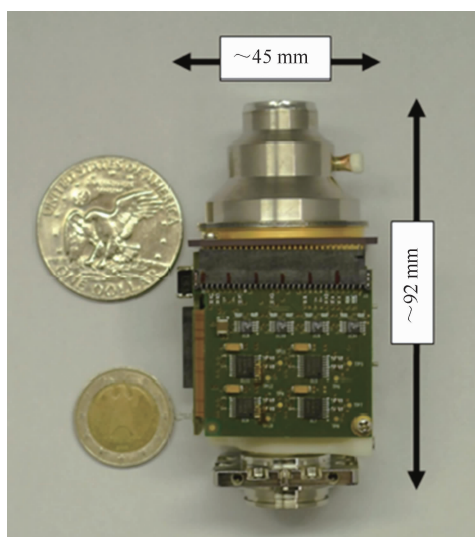


图 8 AIM-MW1280×1024 组件

个测温二极管和 1 路输出, 其杜瓦只用了 1 个 12Pin 连接器。另外, 通过在杜瓦内集成光学镜头和变 F 数结构以及在外壳上设计与系统相适应的辅助结构等, 也可以减小整个探测器机芯的体积。比如以色列 SCD 公司研制的 384×480 组件, 在没有增加组件体积的情况下, 通过内置光学镜片实现了 $105^\circ \times 135.5^\circ$ 的大视场^[5]; AIM 公司的 1280×1024 中波组件(见图 8)则充分利用了外壳部位的空间^[6]。

3 结束语

红外探测器杜瓦的小型化和轻量化是一个永恒的发展方向。杜瓦的小型化设计需要综合

考虑探测器芯片、制冷和应用环境等因素。一方面, 通过提高探测器的工作温度、减小像元间距、精简电路管脚来降低输入端对杜瓦的尺寸需求; 另一方面, 通过耦合小型制冷机、采用多层陶瓷布线工艺、使用标准连接器、优化吸气剂安装方式等来减小杜瓦体积, 同时也要开发体积更小、冷量更大的制冷机和高性能真空吸气装置以支撑杜瓦小型化发展的需求。

参考文献

- [1] 张磊, 东海杰, 王春生, 等. 拼接红外探测器冷头设计 [J]. 激光与红外, 2017, **47**(5): 591–594.
- [2] Nathalie R. Flat Structure Cooled Detector Assembly [C]. SPIE, 1994, **2225**: 428–436.
- [3] Manissadjian A. Compact Dewar and Electronics for Large Format Infrared Detectors [C]. SPIE, 2011, **8012**: 80123L.
- [4] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. $10 \mu\text{m}$ 像元间距 1024×1024 中波红外探测器研制进展 [J]. 激光与红外, 2019, **47**(5): 591–594.
- [5] Michael S. Design of a Cryogenic IR Detector with Integrated Optics [C]. SPIE, 2010, **7660**: 76601Z.
- [6] Lutz H, Breiter R. High-performance IR Detector Modules for Army Applications [C]. SPIE, 2013, **8704**: 87040A.