

文章编号: 1672-8785(2021)09-0021-05

非真空制冷型红外探测器 小型化封装技术

方志浩 张 磊 付志凯 刘 森

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 基于红外探测系统对小体积制冷型红外探测器的应用需求, 提出了一种新型非真空制冷型红外探测器小型化封装技术。阐述了其结构和工艺设计要点, 实现了组件封装并通过耦合 J-T 制冷器进行了相关性能测试。结果表明, 本文所述的设计方案可实现 128×128 元 ($15 \mu\text{m}$) InSb 芯片封装, 组件尺寸小于等于 $\Phi 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 重量约为 5 g, 性能比现有产品显著提升, 探测成像性能可以满足使用要求。该组件的启动时间可达到 4 s 以内, 蓄冷时间目前为 6 s, 制冷性能在后续研究中联合制冷器设计可以得到进一步优化。

关键词: 非真空; 红外探测器; 小型化; 封装技术

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.09.003

Miniaturization Packaging Technology of Non-Vacuum Cooled Infrared Detector

FANG Zhi-hao, ZHANG Lei, FU Zhi-kai, LIU Sen

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

Abstract: Based on the application requirements of infrared detection systems for small-volume cooled infrared detectors, a new type of non-vacuum cooled infrared detector miniaturization packaging technology is proposed. The key points of its structure and process design are explained, the component packaging is realized, and the performance test of the coupled J-T refrigerator is carried out. The results show that the design scheme described in this article can achieve 128×128 ($15 \mu\text{m}$) InSb chip packaging, the components are less than or equal to $\Phi 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, the weight is about 5 g, and the performance is significantly improved compared with existing products. Its detection and imaging performance can meet the requirements of use. The start-up time of this component can be less than 4 s, and the cold storage time is currently 6 s. The refrigeration performance can be further optimized and improved in the follow-up study of the joint refrigerator design.

Key words: non-vacuum; infrared detector; miniaturization; packaging technology

收稿日期: 2021-06-15

作者简介: 方志浩(1994-), 男, 山西忻州人, 工程师, 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

制冷型红外焦平面探测器在 20 世纪 90 年代发展成熟,其在红外光谱范围内拥有较高的量子效率、均匀性和优良的分辨率,性能稳定可靠,响应率和灵敏度极高,被广泛应用于航空航天、国防、气象环境监测、红外天文学和安防系统等领域^[1-4]。

近年来,随着小型无人机、微纳卫星等多种微小型红外探测器搭载平台的快速发展,用户对红外探测器组件的体积、重量和功耗提出了更严格的要求^[5-7]。目前小型的制冷型红外探测器搭载的多为单元、多元、线列芯片。用小面阵芯片代替单元或线列芯片,进一步提高红外探测器的探测性能是未来的发展趋势。目前,搭载较小面阵红外芯片(128×128、256×256 等规格)的探测器的电学引出管脚较多,所需的封装体积较大,不能满足红外系统小型化的需求。因此,我们需要对搭载面阵红外芯片的封装体结构和工艺进行优化设计,解决芯片面阵规模与探测器封装体积之间的矛盾,让小型化、轻量化、低功耗、高性能的红外探测器组件在安防、红外跟踪、预警等领域发挥更加显著的作用^[8-10]。

本文针对非真空制冷型红外探测器小型化、轻量化、高可靠性、高集成度等应用需求,阐述了一种非真空制冷型红外组件的小型化封装技术方案。以 128×128 元(15 μm)小面阵芯片为例,对红外探测器组件封装进行了相关性能测试。与国内现有同类型的产品相比,这种非真空制冷型红外组件的包络尺寸和重量显著降低,探测及成像性能可满足应用需求,但制冷性能仍有待进一步优化。

1 技术目标

这种非真空制冷型红外探测器拟将 128×128 元(15 μm)焦平面芯片封装在非真空微结构中,实现非真空制冷型红外探测器的小型化封装,并适配某型号的 J-T 制冷器,为芯片提供低温工作条件,使探测器可在 90 K 温度下

正常工作,从而满足用户对高探测性能、小体积红外探测器的应用需求。

2 结构及工艺设计

2.1 主要技术难点

现有外包络尺寸小的非真空制冷型红外探测器产品搭载的芯片多为单元、多元、线列探测器,电学信号引出较少。信号引出主要是采用直径为 0.1 mm 左右的漆包线逐个引出,其工艺过程主要依靠手工操作完成。工艺一致性较差,生产效率低下,产品可靠性有待加强。搭载较大面阵芯片杜瓦结构的制冷型红外探测器组件的电学引出采用引线环插针的方式,键合工艺采用球焊或楔焊。工艺效率高,稳定性好,组件可靠性高。但是目前该类探测器的零部件尺寸较大,无法满足特定小型化应用需求。因此,急需开发一种可以搭载较大面阵芯片的新型小型化非真空制冷型红外探测器。

2.2 结构及工艺设计

该类探测器开机后的工作时间较短,可以在非真空状态下工作并完成探测任务。组件要求启动时间尽量短而蓄冷时间尽量长,以达到远距离红外目标跟踪和快速响应打击的目的。因此组件的低漏热设计至关重要,其具体方案如图 1 所示。本组件结构通过采用特殊材质基座连接,降低冷腔部件(用来存储制冷介质)与外壳部件(结构主体)之间的热传导。在引线环与冷腔外壁之间留有间隙,将冷头结构(搭载芯片冷平台)对外热传导中的绝大部分转化为热辐射。探测器的电学引出采用铂铱丝焊接、降低引线漏热等方法来有效降低冷头部件的漏热,从而实现组件的快启动和长时间蓄冷工作。

与一代单元线列红外探测器组件相比,面阵芯片需引出的电学管脚更多。实现组件结构小型化的核心问题是电学引出结构设计。本组件基于真空杜瓦红外探测器结构,最终确定采用芯片-框架-引线环的形式(见图 2)来实现 24 路电学信号引出。

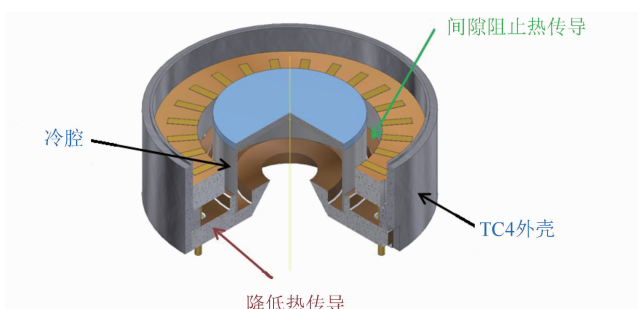


图 1 低漏热结构设计方案

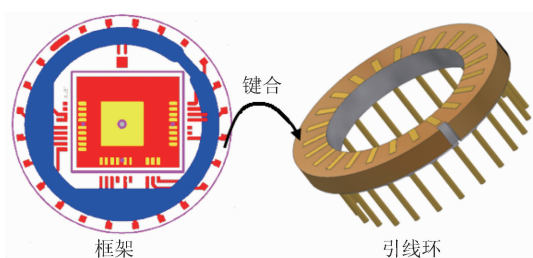


图 2 电学信号引出方案的示意图

该组件的装配主要通过粘接、激光焊接、引线键合等成熟的工艺手段配合芯片粘接工装、引线键合工装等辅助工装完成, 另外还包括零件清洗、除气、打标等辅助工艺。产品封装工艺流程及产品三视图(不带制冷器)如图 3 所示。本组件的设计体积约为 $\phi 19.2 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$, 质量约为 5 g, 可搭载 128×128 元 ($15 \mu\text{m}$) 红外芯片。上述生产封装工艺成熟, 工装设计合理精确。本产品设计无技术及工艺风险。

3 组件封装及测试结果

基于上述结构设计和工艺方案, 对零部件进行了加工、检验、预处理及芯片封装。封装

完成后的组件如图 4 所示。经验证, 该组件封装工艺合理可行, 产品的生产效率相对于现有单元线列组件显著提升, 而成本相对于现有杜瓦组件大幅降低。



图 4 组件实物照片

利用图 5(a)所示的测试工装耦合某型号 J-T 制冷器, 并连接专用测试系统对组件进行性能测试。测试环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 制冷气体采用 40 MPa 的氮气。试验通过测温二极管采集芯片的实时温度。结果显示, 在通气 4 s 内, 组件在 90 K 温度下正常工作, 停止通气后的蓄冷时间约为 6 s。组件测试的输出图像如图 5 (b)所示。组件的噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 24.113 mK , 平均峰值响应率为 $9.18 \times 10^9 \text{ V/W}$, 平均峰值探测率为 $2.58 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。由于本组件目前属于实验阶段, 搭载芯片的盲元较多, 故有关盲元的性能不具备参考性, 暂不列出。

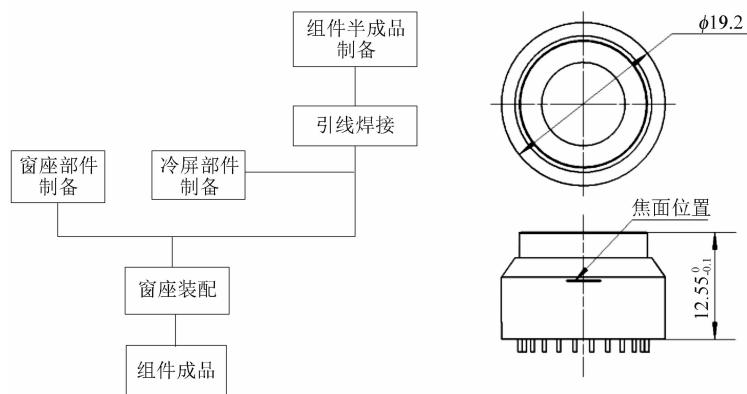


图 3 组件主要工艺流程及设计的三视图

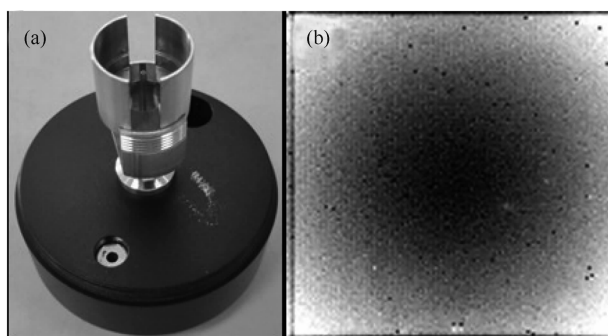


图5 组件及其输出图像

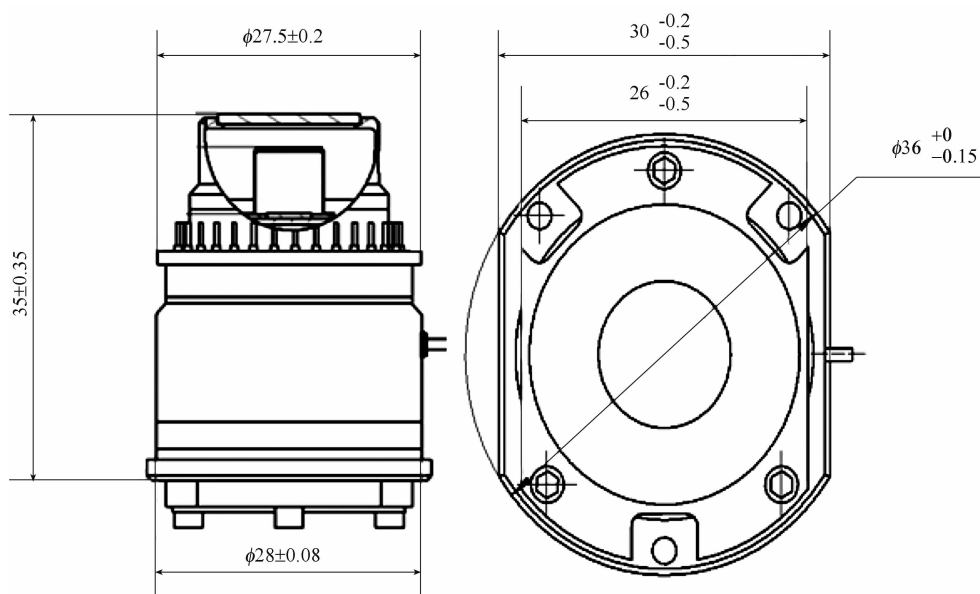


图6 原有组件的外观尺寸示意图

表1 新旧产品的封装参数对比

项目	本设计	原有产品
芯片规格	128×128 元(15 μm)	128×128 元(15 μm)
组件质量	约 5 g	21.6 g
组件体积	约为 $\Phi 19.2 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$	约为 $\Phi 36 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$
零部件加工周期	短	长
平均封装时间	x	2x 以上

4 产品的先进性分析

搭载 128×128 元(15 μm)碲化铟芯片的原某型号非真空制冷型红外探测器组件的外形包络尺寸如图 6 所示。探测器尺寸(不带制冷器)达到 $\Phi 36 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 以上, 体积较大, 结构和封装工艺较复杂。

表 1 列出了本文设计的探测器组件与原有组件的主要封装参数对比情况。可以看出, 两

种封装结构可以搭载同一规格的 InSb 芯片; 本产品的质量仅为原产品的四分之一, 体积缩至原来的一半左右; 本产品所用的零部件更简单, 加工周期更短; 新产品的封装效率是原产品的两倍以上。

5 结束语

本文描述了一种搭载 128×128 元(15 μm)碲化铟芯片的非真空制冷型红外探测器小型化

封装技术。结果表明:

(1) 本设计可以使红外组件的体积小于等于 $\Phi 19.2 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$, 组件的质量仅为 5 g 左右。

(2) 这种非真空制冷型红外探测器小型化封装的设计方案及工艺可行, 24 路引线集成输出, 增强了组件的电学可靠性。

(3) 该小型化封装组件的启动时间可达到 4 s 以下, 蓄冷时间约为 6 s。

(4) 这种非真空小型化封装结构相对于原有同类产品零部件更简单, 零部件的加工成本和周期大幅缩短, 生产效率显著提升。

本文所述的非真空小型化制冷型红外探测器相较于原有的同类产品封装体尺寸和重量上有显著的优势。该产品更容易满足目前红外市场对小型化、低成本、高可靠性、大批量的应用需求, 但是针对探测器的启动时间和蓄冷时间等性能仍有待进一步优化。

参考文献

[1] 李鹏飞. 红外焦平面探测器热-应力耦合分析 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
[2] 吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 等. 碲化物红外探测器

国内外发展综述 [J]. *航空兵器*, 2020, **27**(5): 1-12.

- [3] 柏伟, 赵超, 刘铭. 碲化铟晶体材料的发展及应用 [J]. *人工晶体学报*, 2020, **49**(12): 2230-2243.
[4] 牟宏山. InSb 红外焦平面探测器现状与进展 [J]. *激光与红外*, 2016, **46**(4): 394-399.
[5] Barrière F D L, Druart G, Guérineau N, et al. Development of an Infrared Ultra-compact Multi-channel Camera Integrated in a SOFRADIR's Detector Dewar Cooler Assembly [C]. *SPIE*, 2015, **9451**: 94510E.
[6] 李海燕, 刘佳星, 杜红燕, 等. 小型化碲化铟探测器制备 [J]. *激光与红外*, 2020, **50**(1): 92-95.
[7] 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.
[8] 张磊, 王冠, 付志凯. 红外探测器杜瓦的小型化设计方法 [J]. *红外*, 2020, **41**(9): 15-19.
[9] 梁进智, 徐长彬, 李海燕. 碲化铟红外焦平面阵列制备技术 [J]. *红外*, 2019, **40**(6): 7-12.
[10] 付安英, 商莹, 张金博, 等. 碲化铟红外探测器器件在环境监测分析系统中的应用研究 [J]. *电子设计工程*, 2015, **23**(22): 180-183.

(上接第 13 页)

[103] Holland L, Ojha S M. The Growth of Carbon Films with Random Atomic Structure from Ion Impact Damage in a Hydrocarbon Plasma [J]. *Thin Solid Films*, 1979, **58**(1): 107-116.
[104] 翟树札. 绝缘体与 $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ 界面特性 [J]. *红外与激光技术*, 1988, **10**(4): 64-67.
[105] 居建华, 夏义本, 王林军, 等. 类金刚石薄膜碲镉汞红外器件钝化膜的研究(英文) [J]. *人工晶体学报*, 2000, **29**(3): 253-256.
[106] 史伟民, 李冬梅, 钱永彪, 等. 碲镉汞物理与化学钝化界面的 AES 研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(S1): 23-27.
[107] Dewames R E, Williams G M, Pasko J G, et al. Current Generation Mechanisms in Small Band

Gap HgCdTe p-n Junctions Fabricated by Ion Implantation [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, **86**(1-4): 849-858.

- [108] White J K, Musca C A, Lee H C, et al. Hydrogenation of ZnS Passivation on Narrow-Band Gap HgCdTe [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **76**(17): 2448-2450.
[109] 叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(2): 86-90.
[110] Chen Y F, Chen W S. Influence of Hydrogen Passivation on the Infrared Spectra of $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{-Te}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **59**(6): 703-705.
[111] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.