

文章编号:1001-5078(2024)07-1081-05

· 红外材料与器件 ·

高工作温度碲镉汞红外探测器杜瓦结构研究

张利明, 李艳红, 冯志攀, 宋淑芳, 付志凯, 王冠, 张磊
(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:随着第三代红外探测器技术的快速发展,高工作温度红外探测器成为重要的发展方向。本文报道了在高工作温度碲镉汞红外探测器杜瓦结构小型化、低功耗、高可靠性方面的研究进展。通过杜瓦结构的优化设计,搭配旋转整体式低温制冷机 K562S short,制备出组件体积为 80 mm × 61 mm × 39 mm,重量为 212 g,启动时间为 2.5 min,工作温度达到 150 K 的高工作温度中波碲镉汞红外探测器,并初步完成了组件可靠性试验验证,为高工作温度碲镉汞红外探测器的工程化应用奠定了一定的基础,对高工作温度碲镉汞红外探测器的小型化、低功耗、高可靠性研究具有一定的指导意义。

关键词:高工作温度;碲镉汞;红外探测器;小型化;低功耗;可靠性

中图分类号:TN215;TN74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.012

Research on dewar structure of mercury cadmium telluride infrared detector at high operating temperature

ZHANG Li-ming, LI Yan-hong, FENG Zhi-pan, SONG Shu-fang, FU Zhi-kai, WANG Guan, ZHANG Lei
(11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: With the rapid development of the third generation infrared detector technology, high operating temperature infrared detector has become an important development direction. This paper reports the research progress of the 11th Institute of CETC. in the miniaturization, low power consumption and high reliability of Dewar structure of high operating temperature tellurium cadmium mercury infrared detector. Through the optimized design of the Dewar structure, combined with the rotary integral cryogenic chiller K562S short, the component volume is 80 mm × 61 mm × 39 mm, and the weight is 212 g. The HOT component of medium wave cadmium tellurium mercury infrared detector with a starting time of 2.5 min and a working temperature of 150 K has been preliminarily completed, which has laid a certain foundation for the engineering application of high working temperature cadmium tellurium mercury infrared detector, and has certain guiding significance for the miniaturization, low power consumption and high reliability research of high working temperature cadmium tellurium mercury infrared detector.

Keywords: high operating temperature; mercury cadmium tellurium; infrared detector; miniaturization; low power consumption; reliability

1 引言

红外探测器是成像系统的核心部件,是识别探测以及获取物体信息的关键。红外探测技术具有全天候、作用距离远、穿透和夜视能力强、隐蔽性和抗

干扰能力好等优点,在军事装备、港口管理、汽车夜视、安防监控、气象研究、医疗诊断等军用和民用领域已经得到广泛的应用,下图 1 中 (a) 为红外探测器在安防监控方面的应用, (b) 为红外探测器在港

口管理方面是应用。

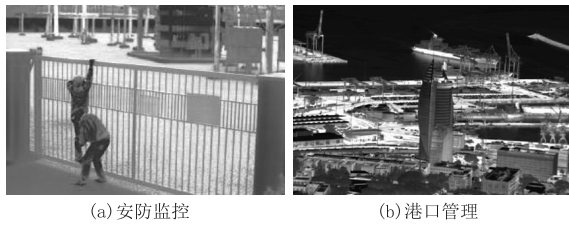


图 1 红外探测器的相关应用场景

Fig. 1 Relevant application scenarios of infrared detectors

随着飞机预警、无人机载领域的目标捕捉等国防需求的日益提升,针对军事领域红外探测器的应用不断加大,其研发水平也在不断提高。高工作温度碲镉汞红外探测器作为近年来发展起来的一款新型探测器,由于其更小尺寸、更轻重量、更低功耗等特点,可以很好的满足单兵手持、无人机载等军事领域的应用需求。碲镉汞材料具有光吸收效率高、带隙可调节、响应波段广的优点^[1],已经成为第三代红外焦平面探测器材料研究的主流。高工作温度碲镉汞红外探测器具有系统功耗小、尺寸重量小、系统寿命长等优点,可满足精确制导、无人平台、侦察告警等领域对高性能、高可靠性的低功耗焦平面探测器的需求^[2]。目前,国外主要的红外探测器研究机构 Raytheon、Teledyne、Sofradir、Selex、AIM 等已先后报道了高工作温度碲镉汞红外探测器的研究进展,其中,中波可以实现 150 ~ 250 K 的工作温度,长波可以实现 120 ~ 160 K 的工作温度^[3-7]。国内的红外探测器主要研究机构昆明物理研究所、武汉高德公司先后报道了 120 ~ 150 K 的中波高工作温度碲镉汞红外探测器^[8-10]。

本文介绍了中国电子科技集团有限公司第十一研究所(简称:中电 11 所)在高工作温度碲镉汞红外探测器方面的研制情况,针对高工作温度碲镉汞红外探测器的“SWaP³”^[11-12]特点,对杜瓦组件进行了小型化、低功耗、高可靠性方面的研究。通过对杜瓦结构的重新设计优化、冷头材料体系和结构的变化等方面研究,制备出小型化、低功耗、高可靠性的高工作温度中波碲镉汞红外探测器(简称:HOT 组件)。

2 杜瓦组件低功耗、小型化设计

本文在中电 11 所研制的 Leo 红外探测器组件的基础上,对微杜瓦组件的结构进行迭代设计,重点进行杜瓦结构低漏热、小型化与高可靠性设计,获得

低热耗、小型化与高可靠性杜瓦组件。

杜瓦内部是超高真空,不考虑腔体内对流传热。微杜瓦的热负载仅仅是由于冷端(包括冷头、冷屏)与外界(即外壳、窗座等)的传导与辐射换热所引起的,固体传热主要包括冷指的轴向传热、引线传热及支撑杆传热。辐射传热主要包括杜瓦内壁、窗片与低温滤光片、冷屏、冷指等多个辐射面的辐射传热。

为满足项目需求,同时适应小型化与轻量化的发展趋势,选用专门为 HOT 探测器设计的旋转整体式低温制冷机 K562S short,相比较于 Leo 红外探测器使用的制冷机,它采用更高性能的新型电机,冷指薄壁由原来的 80 ~ 100 μm 降低到 50 ~ 60 μm ,且冷指长度得到了一定程度的缩减,因此具有更高的传热效率^[13],K562S short 制冷机的外形轮廓图如图 2 所示。

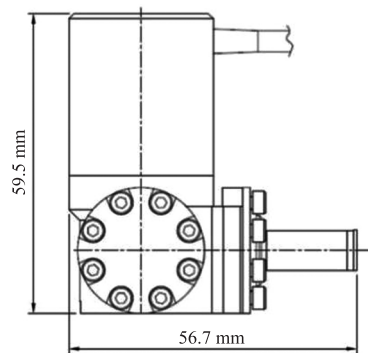


图 2 K562S short 制冷机外形轮廓图

Fig. 2 Outline of K562S short refrigerator

与制冷机配合的杜瓦冷指,材料选择选用导热差、刚度好的 TC4 材料;为了保证杜瓦的真空绝热,冷指设计为薄壁、悬臂结构,减小由冷指传导引起的杜瓦漏热。制冷机冷指长度的减少有利于杜瓦冷指长度的减少。杜瓦冷指长度的减少和冷指材料的改变降低了冷指部分的热耗,同时提供了杜瓦体积缩小的空间;通过缩小过渡环与外壳的体积、收缩杜瓦内部冗余空间,实现了杜瓦的小型化与轻量化;通过对冷屏和窗座重新设计,减小冷屏和窗座的体积和表面积。为了减少由于辐射引起的热负载,组件采用金属零件表面抛光镀镍、冷屏外表面镀金表面处理工艺,降低金属零部件的表面辐射系数,从而减少辐射热,来有效降低杜瓦辐射漏热。

图 3 中(a)为 Leo 组件红外探测器杜瓦,(b)为 HOT 组件红外探测器杜瓦三维模型图。

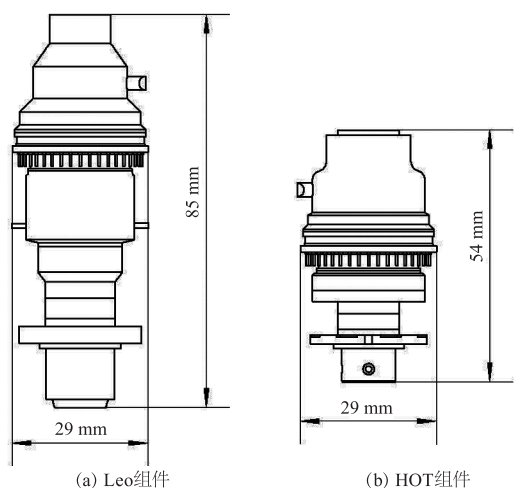


图3 组件杜瓦模型图

Fig. 3 Component dewar model diagram

通过实际测量,Leo 红外探测器组件杜瓦体积为 85 mm × 29 mm × 29 mm,重量为 54.2g,在 23 °C 条件下的静态热负载为 194 mW。HOT 红外探测器组件杜瓦体积为 54 mm × 29 mm × 29 mm,重量为 38.3 g,在 23 °C 条件下的静态热负载为 173 mW。HOT 红外探测器相比于 Leo 红外探测器,杜瓦体积减小 36.5%,重量减少 29.3%,在 23 °C 条件下的静态热负载降低 10.8%。

3 杜瓦组件可靠性校核

针对 HOT 红外探测器低温工作的特点,通过低应力封装结构设计来保证其可靠性满足要求。高工作温度碲镉汞红外探测器的冷头结构是一个多层结构,由碲镉汞探测器芯片、互连钢柱区、硅读出电路、低温粘接胶、探测器框架、陶瓷结构件等多层材料体系组成。当探测器在低温工作时,由于各层材料热膨胀系数的差异,材料之间的热失配产生应力,使得整个模块系统产生低温形变。红外焦平面探测器在投入正常使用也会经历数次温度循环。在这些过程中,探测器冷头始终承受较大的,同时不断变化的热应力和形变的影响,因此冷头各结构组成部分在循环往复的变形中,红外焦平面探测器容易发生疲劳失效。

为了避免热失配对 HOT 红外探测器芯片低温工作的影响,对冷头结构开展了低应力低形变的多层陶瓷框架的设计。多层陶瓷框架结构的设计可以有效缓减硅读出电路与冷台面金属材料之间由于膨胀系数不匹配引起的温度应力,每层陶瓷框架之间同时也考虑热适配,保证冷头结构的可靠性。

为了增加组件在力学环境下的可靠性,悬臂冷指选用刚度较好的 TC4 材料,外壳、窗座等选用可伐材料;冷指、冷屏等过渡部位增加圆角设计,并适当增加壁厚。设计完成后,采用有限元分析软件 ANSYS 进行了探测器杜瓦组件的热力学可靠性分析。

根据 HOT 红外探测器芯片尺寸规模以及结构状态进行 150 K 仿真分析,通过仿真结果,发现 HOT 红外探测器红外探测器芯片低温变形可控制在 10 μm 以内,全芯片的低温应力分布可控制在 24 Mpa 以下。相比于 Leo 组件的低温变形 22.6 μm,全芯片的低温应力 54.5 Mpa,均得到大幅下降。仿真得到 HOT 组件的焦平面的低温应力与低温变形分别如图 4 和图 5 所示;Leo 组件的焦平面的低温应力与低温变形分别如图 6 和图 7 所示。

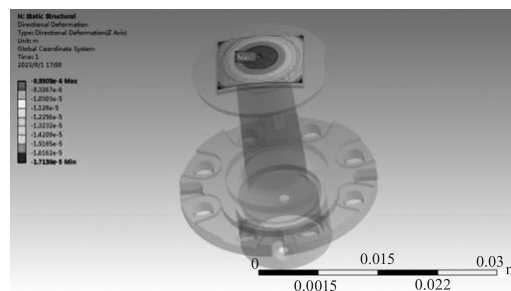


图4 HOT 组件芯片低温面形结果

Fig. 4 Low temperature surface shape results of HOT component chip

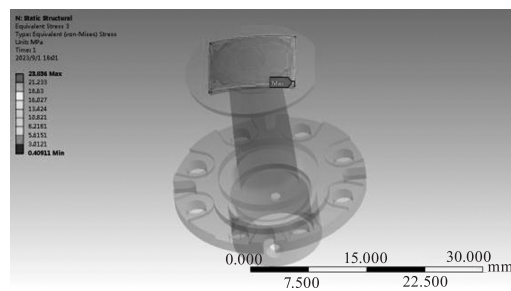


图5 HOT 组件芯片低温应力结果

Fig. 5 Low temperature stress results of HOT component chip

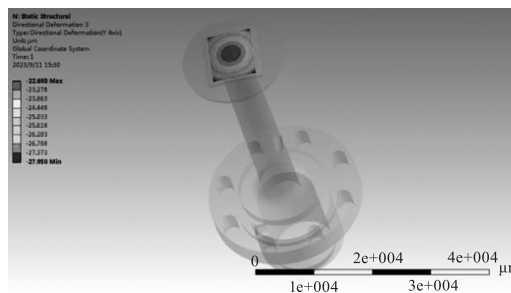


图6 Leo 组件芯片低温面形结果

Fig. 6 Low temperature surface shape results of Leo component chip

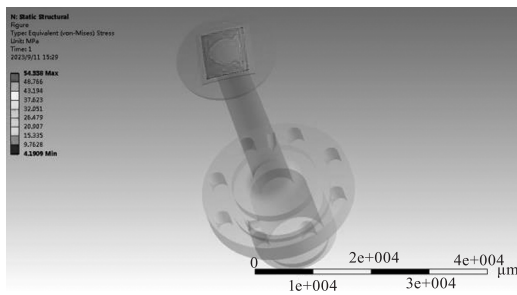


图 7 Leo 组件芯片低温应力结果

Fig.7 Low temperature stress results of Leo component chip

4 组件封装可靠性验证

通过对高工作温度碲镉汞红外探测器小型化、低功耗、高可靠性研究,完成杜瓦封装,耦合制冷机之后的 HOT 组件实物与 Leo 组件的实物对比如下图 8 所示。HOT 组件实物与 Leo 组件的相关参数对比如表 1 所示。



图 8 组件实物对比图

Fig.8 Component physical comparison diagram

表 1 组件相关参数对比

Tab.1 Comparison of components related parameters

参数	Leo 组件	HOT 组件
体积/mm ³	119 × 82 × 46	80 × 61 × 39
重量/g	330	212
制冷时间/min	4	2.5

对 HOT 组件进行了超过 200 次开关机可靠性考核,每次开机探测器工作 20 min,总计工作时间达到 4000 min,组件的盲元、响应率非均匀性、平均峰值探测率无明显变化,证实了 HOT 组件的封装可靠性。实验数据见表 2。

5 结论

本文对高工作温度碲镉汞红外探测器进行了低功耗、小型化、高可靠性研究专题研究,主要从杜瓦结构的迭代优化设计、冷头材料体系和结构的变化

等方面展开。新设计的杜瓦组件通过与 K562S short 制冷机进行耦合,研制出高工作温度中波碲镉汞红外探测器组件。较上一代 Leo 组件,新研制的 HOT 组件,体积减小 58%,重量减少 36%,制冷时间缩短 38%。

表 2 高工作温度中波碲镉汞红外探测器可靠性试验结果

Tab.2 Reliability test results of medium-wave MCT infrared detector at high operating temperature

平均黑体探测率/ (cm · Hz ^{1/2} · W ⁻¹)	响应率 不均匀性/%	有效 像元率/%	开关机 累计次数
1.05 × 10 ¹⁰	8.75	98.46	10
9.52 × 10 ⁹	8.73	98.443	50
1.07 × 10 ¹⁰	8.73	98.451	100
1.12 × 10 ¹⁰	8.73	98.439	150
1.05 × 10 ¹⁰	8.69	98.445	200

新研制的 HOT 组件工作温度达到 150 K,初步实现了该组件的小型化、低功耗与高可靠性,有助于推动此类高工作温度红外探测器探测器在单兵手持、无人机载等军事领域的工程化应用。

参考文献:

- [1] Rogalsk A, Martyniuk P, Kopytko M, et al. Trends in performance limits of the HOT infrared photodetectors[J]. Appl Sci., 2021, 11(2):501.
- [2] Yang Chaowei, Zhao Peng, Huang Wei, et al. Research of mercury cadmium telluride infrared focal plane device with high operating temperature p-on-n[J]. Infrared and Laser Engineering, 202, 51(12):55-59. (in Chinese) 杨超伟,赵鹏,黄伟,等.高工作温度 p-on-n 中波碲镉汞红外焦平面器件研究[J].红外与激光工程, 2022, 51(12):55-59.
- [3] Pillans L, Baker I, Mcewen R. Ultra-low power HOT MCT grown by MOVPE for handheld applications[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9070:407-418.
- [4] Schaake H, Kinch M, Strong R, et al. High operating temperature MWIR detectors[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7608:907-919.
- [5] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. High operating temperature IR-modules with small pitch for SWaP reduction and high performance applications[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8185:342-349.

- [6] Bllon-Lanfrey D, Tribolet P, Pistone F, et al. New IR detectors with small pixel pitch and high operating temperature[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7854: 128 – 138.
- [7] Lee D, Carmody M, Piquette E, et al. High-operating temperature HgCdTe; a vision for the near future[J]. J. Electron Mater, 2016, 45(9): 4587 – 4595.
- [8] Chen H, Shi C, Hu S, et al. Study on p-on-n technology of the MWIR HgCdTe for hot work[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(4): 435 – 438. (in Chinese)
陈慧卿, 史春伟, 胡尚正, 等. 中波碲镉汞 p-on-n 高温工作技术研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(4): 435 – 438.
- [9] Chen Jun, Xi Zhongli, Qin Qiang, et al. Development of mercury cadmium telluride high temperature infrared detector components [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(1): 24 – 30. (in Chinese)
陈军, 习中立, 秦强, 等. 碲镉汞高温红外探测器组件进展[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 24 – 30.
- [10] Yang Z, Zhang B, Du Y, et al. A study of manufacture HgCdTe HOT MW infrared detector[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 204 – 208. (in Chinese)
杨朝臣, 张冰洁, 杜宁等. 碲镉汞高温中波红外探测器的制备研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 204 – 208.
- [11] Alain M, Laurent R, Yann R, et al. Improved IR detectors to swap heavy systems for SWaP[J]. Proc. of SPIE, 2012, 8353: 835334.
- [12] Lutz H, Breiter R, Figgemeier H, et al. Improved high operating temperature MCT MWIR modules[J]. Proc. of SPIE, 2014, 9070: 90701D.
- [13] Zhao Wenli, LI Haolan, Sun Hao, et al. Research progress of rotary stirling refrigerator for HOT devices[J]. Infrared Technology, 2023, 45(2): 195 – 201. (in Chinese)
赵文丽, 李昊岚, 孙皓, 等. HOT 器件用旋转式斯特林制冷机研究进展 [J]. 红外技术, 2023, 45(2): 195 – 201.