

文章编号: 1001-9014(2009)02-0085-05

红外焦平面可靠性封装技术

龚海梅, 张亚妮, 朱三根, 王小坤, 刘大福, 董德平,
游达, 李向阳, 王平, 朱龙源, 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 系统研究了红外焦平面组装、封装及其可靠性技术, 解决了组件结构模拟、子模块精确定位、扁平引线设计、低漏率激光焊接、杜瓦内表面气体解吸分析及其解决途径等理论与技术问题, 进行了组件可靠性、器件的高能粒子辐照与激光辐照等试验, 获得了一批实用化焦平面组件杜瓦和扁平引线, 并均已转入工程研制. 研究结果表明微型杜瓦的热负载小于 250mW, 真空保持寿命大于 1 年半.

关键词: 红外焦平面; 封装; 可靠性

中图分类号: TN73.7745 **文献标识码:** A

STUDY OF RELIABLE PACKAGING FOR IRFPA DETECTOR

GONG Hai-Mei, ZHANG Ya-Ni, ZHU San-Gen, WANG Xiao-Kun, LIU Da-Fu,
DONG De-Ping, YOU Da, LI Xiang-Yang, WANG Ping, ZHU Long-Yuan, FANG Jia-Xiong
(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Techniques of assembly, packaging and reliability of infrared focal plane array (IRFPA) were systematically studied. Some theoretic and technical problems were solved, such as the simulation of assembly conformation, high precision allocation of the modules, the design of flat leading wire, low leakage rate of laser welding, the way to decrease outgassing of Dewar inner surface. For the IRFPA detector the tests of assembly reliability, high-energy particle and laser irradiations were carried out. A batch of practical infrared focal plane Dewar assembly and flat leading wire were obtained. These techniques have been implemented in project. The experimental results show that the thermal load of micro-Dewar is less than 250mW and the vacuum life of Dewar is more than 18 months.

Key words: IRFPA; packaging; reliability

引言

红外焦平面可靠性封装技术是红外焦平面的组件化、实用化及工程化的关键工艺和技术基础之一, 它涵盖了从带有读出电路的红外焦平面阵列 (IRFPA) 完成后到提供系统使用前的一系列工艺技术, 主要包括低温封装及测试、致冷及接口、空间环境适应性等, 一般又称为 IRFPA 后道技术.

据法国红外探测器公司 (SOFRADIR) 报导^[1,2], 低温封装是批量生产碲镉汞红外焦平面探测器的一个重要部分和关键技术, 关系到系统的性能和生产率, 同红外焦平面阵列的生产过程相比, 因受自动化程度的限制, 红外焦平面封装技术对设备、工艺和技

术的依赖性更强, 难度更大, 技术含量更高, 因此, SOFRADIR 在低温封装的基础研究和技术方面投入了大量的精力, 取得了显著的效果. 另据美国国防先进计划属 (DARPA) 报导^[3], 美国在红外焦平面组件技术的研制过程中, 探测器材料、器件和读出电路占 20%, 配套电子器件占 20%, 而致冷封装和致冷机都分别占到 30%, 反映了红外焦平面组件实用化的技术难度及其重要性.

针对 IRFPA 的应用需求, 通过对红外焦平面组装、封装及其可靠性技术所涉及的应用基础问题展开了系统的研究, 解决了组件结构模拟、子模块精确定位、扁平引线设计、高气密激光焊接、杜瓦内表面气体解吸分析及其解决途径、组件可靠

收稿日期: 2008-04-15, 修回日期: 2008-09-22

Received date: 2008-04-15, revised date: 2008-09-22

基金项目: 国家自然科学基金重点 (50632060) 和中国科学院创新基金 (CXJJ-239) 资助项目

作者简介: 龚海梅 (1965-), 男, 江苏海门人, 研究员, 主要从事探测器、封装及可靠性研究.

性试验以及器件的粒子与激光辐照等一系列理论与技术问题. 本文重点介绍其中的主要科技问题及创新点.

1 红外焦平面组件组装的组件结构模拟设计与热力学分析

红外焦平面组件的组装技术主要包括组件的结构设计、热力学计算、微小轻型化结构模拟、抗电磁干扰及抗强冲击的大面积蓝宝石无源电路衬底、解决焦平面基底和杜瓦冷端的温度均匀性问题、焦平面芯片的精密定位与视场配准以及冷屏设计及低温滤光片耦合技术等关键技术. 这里重点介绍 IRFPA 组件的结构模拟设计与热力学分析的结果.

研究的 IRFPA 组件采用直接倒焊形式, 将 IRFPA 组件分成三部分进行分析, 具体如下: 由 0.35mm 厚的 GaAs 衬底、10 μ m 厚的 In 柱及其四周灌注的 DW3 低温胶和 0.5mm 厚的 Si 材质的读出电路组成顶层; 由 0.33mm 厚的芯片宝石衬底、10 μ m 厚的 DW3 低温胶和 0.5mm 厚的柯伐基板组成中间三层; 由 0.4mm 厚的柯伐基板、0.5mm In 片和 2.2mm 厚的柯伐冷头组成底三层.

首先通过实验测定组件结构所涉及的各种金属、胶等材料在低温下的热膨胀系数、杨氏模量等热力学参数, 采用 ANSYS 有限元模型, 分析了组件结构的力学特性. 图 1 为 IRFPA 组件顶三层的结构及其力学分析结果, 图 2 为 FPA 组件中间三层的结构及其力学分析结果和表面形变的实测结果, 图 3 为 IRFPA 组件底三层的结构及其力学分析结果. 通过对组件结构模拟设计与热力学分析, 结果表明组件结构合理, 在低温下不会因为热失配造成探测器失效.

2 红外焦平面组件的封装技术

红外焦平面组件的封装技术主要包括金属杜瓦组件的结构设计、低漏率焊接工艺、低放气表面钝化工艺、焦平面组件与杜瓦及致冷器的电接口、超高灵敏度真空检漏与残气分析、长期超高真空排气等, 它们为影响金属杜瓦寄生热负载、真空寿命和可靠性的关键因素. 这里重点介绍焦平面微型杜瓦的激光焊接和表面除气这两项影响 IRFPA 组件封装杜瓦寿命的最重要技术的研究结果.

2.1 焦平面微型杜瓦的激光焊接技术^[4]

高气密性密封焊接是关系到焦平面杜瓦寿命的首要因素, 其主要涉及特殊结构、同异种金属间、非

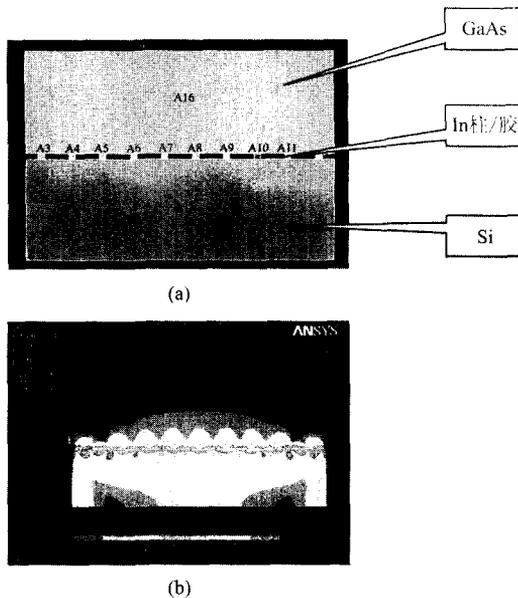


图 1 IRFPA 组件顶三层结构(a)及其力学分析结果(b)
Fig.1 The top three layer structure of IRFPA assembly (a) and the analytic result of mechanics (b)

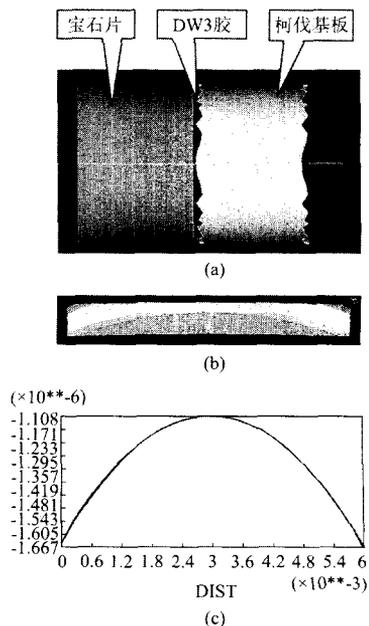


图 2 IRFPA 组件中间三层结构(a)及其力学分析结果(b)和表面形变的实测结果(c)
Fig.2 The medial three layer structure of IRFPA assembly (a) the analytic result of mechanics (b) the metrical result of the exterior deformation (c)

金属与金属间的低漏率焊接.

通过对焊缝的精细定位与激光焦距及激光能量等的控制, 获得了极小漏孔和合适的激光焊斑, 确定了激光焊接的工艺条件, 进一步降低了杜瓦制备的焊接漏率. 获得的杜瓦最小漏率可以达到 1.2 \times

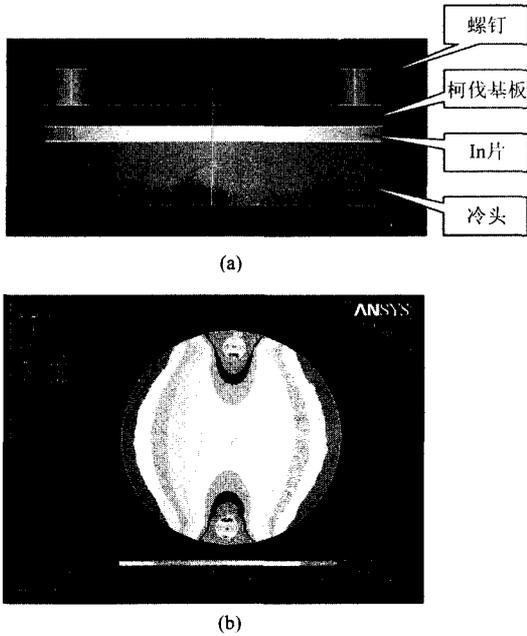


图3 IRFPA 组件底三层结构(a)及其力学分析结果(b)
Fig. 3 The bottom three layer structure of IRFPA assembly (a) the analytic result of mechanics(b)

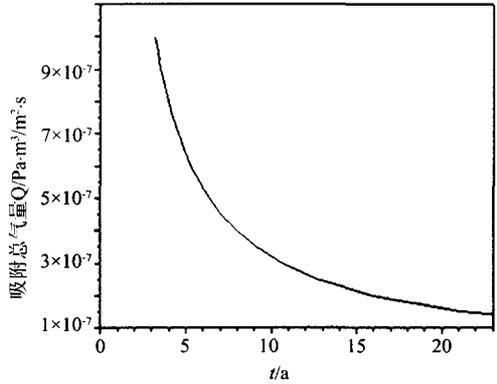


图5 杜瓦真空寿命与杜瓦真空夹层单位体积总气量的关系
Fig. 5 Vacuum life versus unit volume gas output of Dewar

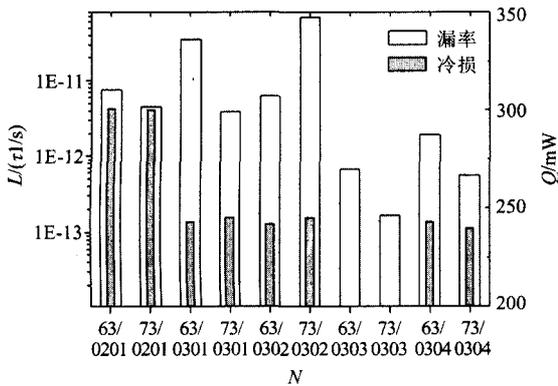


图4 一批杜瓦的最终漏率与冷损
Fig. 4 Final leakage and thermal load of a batch of Dewar

$10^{-13} \tau \cdot l/s$ (见图4). 改进工艺后组件的热负载均小于 250mW.

2.2 杜瓦内表面气体解吸分析与降低材料放气的工艺途径^[5]

抑制 IRFPA 微型杜瓦内部各种材料及内表面的放气是提高杜瓦真空寿命的另一关键因素. 通过分析杜瓦金属表面扩散、蒸发、渗透、焊缝微漏和解吸等各种放气因素, 判明解吸为最主要的放气源, 并采用化学吸附的 Langmuire 模型, 计算了杜瓦单位面积的气体吸附量及其与杜瓦真空寿命之间的关系 (见图5); 计算了未处理不锈钢、不同工艺热处理不锈钢的表面出气率与排气时间的关系 (见图6), 考

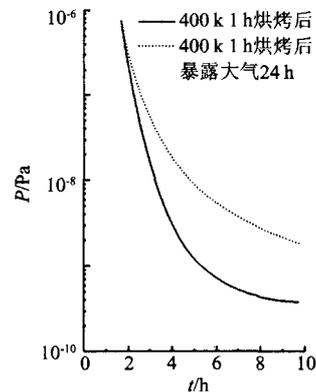


图6 不同热处理后不锈钢表面的出气率与时间的关系
Fig. 6 Gas efficiency of stainless steel after different heat treatments versus time

虑了表面气体扩散及表面氧化层的影响.

据此, 确定了杜瓦金属表面处理的工艺途径, 即, 选用低放气率牌号的不锈钢材料以获得杜瓦内壁最小放气量, 并对材料进行一定条件的高真空、高温除气, 同时改进杜瓦的制备工艺以兼容满足杜瓦的高温除气条件, 进一步降低杜瓦封装后材料的放气率.

图7 为表征杜瓦性能的重要参数——冷损值随时间变化的实验测量结果. 通过对 63/0301 组件冷损进行跟踪测试, 表明杜瓦真空寿命已经超过一年半.

3 红外焦平面组件的可靠性技术

红外焦平面组件的可靠性技术主要包括航天应用红外焦平面组件真空热浸退火、结构及力学的可靠性试验、红外焦平面的早期稳定性和鉴别技术及其寿命试验等, 是解决其抗强辐射加固技术、真空热浸试验、力学试验、寿命试验等的关键问题, 对提高航天应用红外焦平面组件的稳定性、可靠性及其抗

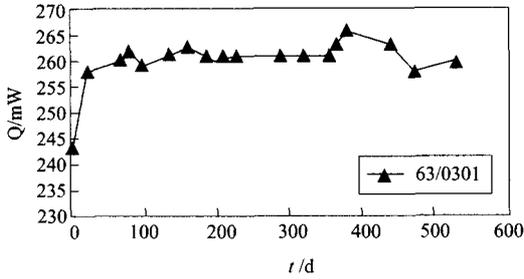


图7 杜瓦冷损值随时间变化的实验结果
Fig. 7 Thermal load of Dewar versus time

辐射加固能力起到关键作用。

3.1 红外焦平面组件的可靠性试验

进行了红外焦平面组件杜瓦的可靠性试验和焦平面器件及其衬底材料的高能电子辐照实验的方案设计,对红外焦平面/微型杜瓦组件品进行了正弦振动和冲击的力学可靠性摸底试验,表明杜瓦组件的结构、引线、真空、性能等基本能适应航天应用一般力学环境的要求.表1为短波焦平面/杜瓦组件力学试验前后测试结果的比较.

3.2 碲镉汞器件的粒子辐照

较系统地研究了航天红外探测器的探测率、响应率、响应波长、优值因子 R_0A 等重要性能参数受(粒子、质子、氧离子和电子等高能粒子辐射的损伤机理,获得了碲镉汞红外探测器辐照性能衰退、失效的机理,建立了抗辐射加固碲镉汞探测器的计算机模拟实验方法.主要结果为:(辐照将导致碲镉汞器件的缺陷能级发生移动、俘获截面增大、电流机制变化;质子和氧离子辐照产生光谱响应的红移,且在辐射达到特定剂量时出现明显的窄带现象;电子辐照对光伏器件的暗电流、动态零偏电阻和光谱响应产生一定的影响,探测率的变化趋势不一,但总体上在低于 $4 \times 10^6 \text{ Rad (Si)}$ (或 $4 \times 10^4 \text{ GY}$) 的剂量下无显著衰退(见图8).因此综合结果表明,碲镉汞探测器

表1 短波焦平面/杜瓦组件力学试验前后测试结果

Table 1 The results of the short-wave FPA/assembly of Dewar measured before and after the experiments of mechanics

测试项目	力学试验前	振动/冲击试验后
芯柱检查	与制冷器配合正常	外观与制冷器配合正常
引线检查	测温及输出波形正常	测温及输出波形正常
真空检查	保持 $\geq 1\text{h}$	保持 $\geq 1\text{h}$
信号 $V_R(V)$	1.807E+09	1.674E+09
噪声 $V_N(V)$	1.452E-04	1.766E-04
偏置电压 $V_{\text{bias}}(V)$	3.61	3.60
参考电压 $V_{\text{b.ref}}(V)$	2.10	2.09

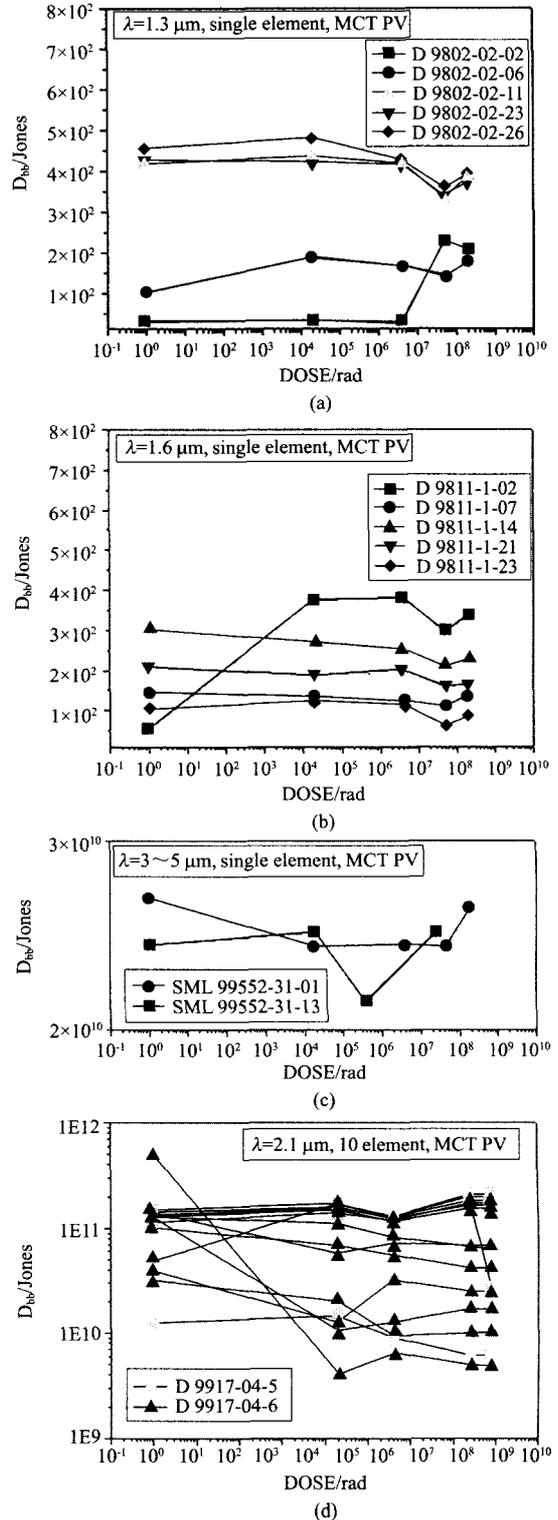


图8 不同剂量电子辐照对各波段航天红外探测器探测率的影响
Fig. 8 Band detectivity of space infrared detector versus electron irradiation dose

抗粒子辐射加固剂量已提高到近 10^4 GY 量级的国际先进水平。

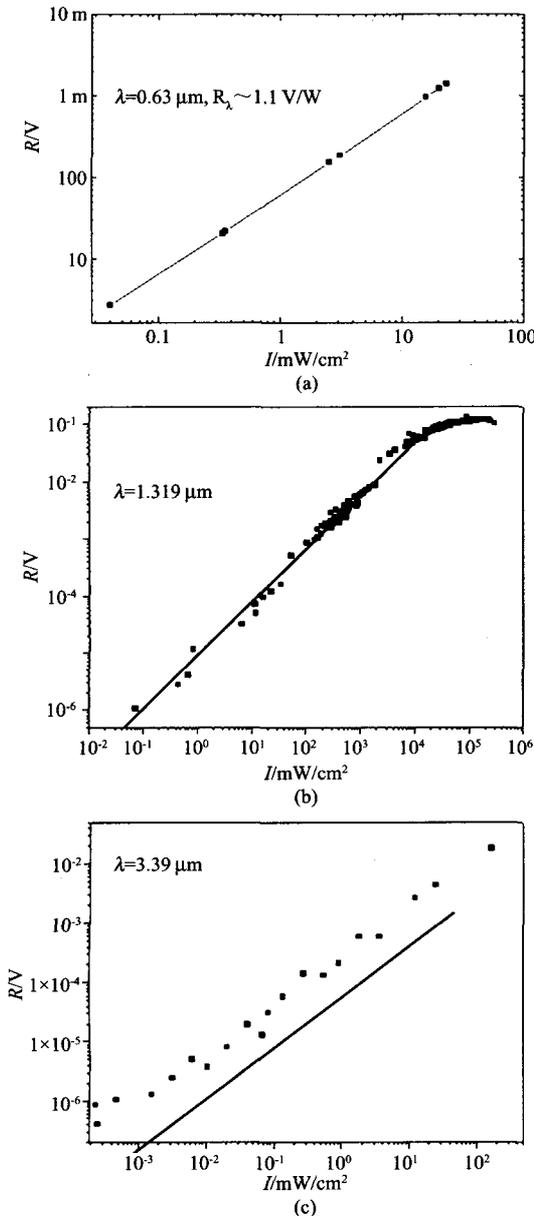


图9 碲镉汞器件对波长分别为 $0.63 \mu m$ (a)、 $1.319 \mu m$ (b) 和 $3.39 \mu m$ (c) 的激光辐照强度 I 的响应曲线
 Fig.9 HgCdTe detector responsivity versus laser irradiation intensity I for different laser wavelengths of $0.63 \mu m$ (a)、 $1.319 \mu m$ (b) 和 $3.39 \mu m$ (c)

3.3 碲镉汞器件的激光辐照

采用不同波长的激光器及衰减系统,对碲镉汞红外探测器进行了激光辐照试验,测量了器件的动态响应范围及其损伤阈值(见图9);对短脉冲准连续 CO_2 激光器 ($10.6 \mu m$),建立了红外探测器激光辐照损伤研究的实验方法,并进行了辐照试验及对辐照过程的实时测量,获得了一些有价值的实验结果。

4 结语

红外焦平面可靠性封装技术是红外焦平面的组件化、实用化及工程化的关键工艺和技术基础之一,通过系统研究红外焦平面组装、封装及其可靠性技术,解决了组件结构模拟、子模块精确定位、扁平引线设计、低漏率激光焊接、杜瓦内表面气体解吸分析及其解决途径、以及组件可靠性试验、器件的粒子与激光辐照等理论与技术问题,并将这些技术应用于工程项目.该项目的微型杜瓦热负载小于 $250mW$,真空保持寿命大于1年半.为在“十·五”期间我国新一代航天有效载荷对地观察遥感仪,迫切需要多光谱红外焦平面组件解决工程化关键基础技术,为我国卫星用红外探测器抗辐射加固剂量的大幅度提高,发挥了重要作用。

REFERENCES

- [1] GU Ju-Xing. Technical problems occur in large scale production of HgCdTe[J]. (顾聚兴.大量生产 HgCdTe 所遇到的技术问题上.红外),2002,23(12):27—33.
- [2] GU Ju-Xing. Technical problems occur in Large scale production of HgCdTe[J]. (顾聚兴.大量生产 HgCdTe 所遇到的技术问题下.红外),2003,24(01):35—39.
- [3] Balcerak R S. Technology for infrared sensors produced in low volume, <http://www.darpa.mil/mto/sensors/irfpa/index.html>.
- [4] Tan C W, Chan Y C, Leung B N W, et al. Characterization of Kovar-to-Kovar laser welded joints and its mechanical strength[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43: 151—162.
- [5] Shin Y H, Lee K J, Jung C K H. Study of outgassing of stainless steel with various surface treatments[J]. *Vacuum*, 1996, 47(6—8):679—682.