

InSb 焦平面探测器高低温循环特性研究

王洋¹, 鲁星², 孟超^{1,3}, 刘俊明^{1,3}, 邝永变^{1,3}, 孟庆端⁴, 朱旭波^{1,3}, 司俊杰^{1,3}

- (1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471099;
2. 驻中国空空导弹研究院军事代表室, 河南 洛阳 471099;
3. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471099;
4. 河南科技大学 电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 制冷型 InSb 红外焦平面探测器工作时需降温至低温(80 K), 器件在整个生命周期会经受从常温(300 K)到低温(80 K)的上千次高低温循环。针对该型探测器开展了高低温循环特性试验, 测试和分析了上千次高低温循环过程中器件光电性能、杜瓦热负载和 J-T 制冷器特性的变化。试验结果表明, 探测器可以经受至少 2 000 次高低温循环, 并且探测率变化的幅度 $\leq 5.5\%$ 、响应率变化的幅度 $\leq 4.8\%$ 、盲元数未发生增加。研究结果为器件的工艺研发和改进提供了参考。

关键词: InSb 焦平面探测器; 高低温循环; 参数变化; 可靠性

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3701-06

Thermal cycle characteristic of InSb focal plane array detector

Wang Yang¹, Lu Xing², Meng Chao^{1,3}, Liu Junming^{1,3}, Kuang Yongbian^{1,3}, Meng Qingduan⁴,
Zhu Xubo^{1,3}, Si Junjie^{1,3}

- (1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471099, China;
2. PLA's Military Representative Office in China Airborne Missile Academy, Luoyang 471099, China;
3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471099, China;
4. Electronics and Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The cooled InSb infrared focal plane array (IRFPA) detectors should work in the temperature as low as 80 K. As a result, detectors are commonly subjected to thousands of thermal cycle from 80 K to room temperature(300 K) in the entire life cycle. Thermal cycle characteristic of the InSb IRFPA detector was studied. The FPA photoelectric parameter, Dewar heat load and J-T cooling characteristics were analyzed. The results indicated that the maximal fluctuation of the detectivity was 5.5%, the maximal fluctuation of the responsivity was 4.8%, and the number of dead pixels did not increase. The experimental results exhibited that the detectors could undergo at least 2 000 thermal cycles, which provides reference for the research and improvement of detector fabrication.

Key words: InSb infrared focal plane array detectors; thermal cycle; parameter variation; reliability

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(YGZJJ02)

作者简介: 王洋(1986-), 女, 硕士生, 主要从事光电器件可靠性评估方面的研究。Email: 446364485@qq.com

导师简介: 司俊杰(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事半导体光电材料和器件方面的研究。Email: Si_Junjie@126.com

0 引言

响应在 $1\sim 5.5\ \mu\text{m}$ 波段的制冷型 InSb 焦平面探测器具有灵敏度高(比 PtSi)、工艺成熟(相对于 MCT)、成本效益好等优点,目前在军用红外成像领域占据主导地位,是红外整机的重要部件。制冷型探测器主要由光敏芯片、杜瓦、制冷器等构成。从生产研制、交付试验、系统调试到最终完成探测使命的整个生命周期需要经历上千次从近常温(300 K)到工作点(80 K)的高低温循环。由于焦平面探测器光敏芯片由芯片、钢柱、读出电路、填充物等材料组成,各种材料的热膨胀系数不可能完全匹配,所以高低温循环会给器件带来较大的热应力和热冲击,这对焦平面探测器的可靠性是严酷的考验^[1]。

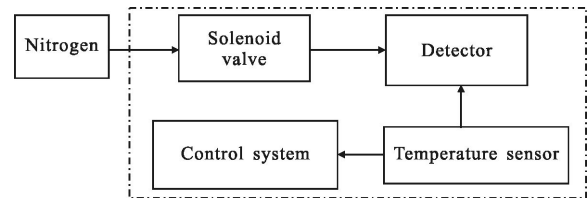
探测器广泛应用在武器、空间监测、测量^[2-4]等领域。可靠性是影响探测器适用性和寿命周期费用的重要特性,尤其是在航空、航天等军事产品的应用上^[5-6]。国外在焦平面探测器可靠性方面开展了大量研究,法国 Sofradir 公司选用 $30\ \mu\text{m}$ 320×256 、 $20\ \mu\text{m}$ 640×512 、 $15\ \mu\text{m}$ $1\ 240\times 1024$ 等各种阵列规模的 HgCdTe FPA 进行高低温循环试验,其中 $320\times 256\ 30\ \mu\text{m}$ 经过 17500 次高低温循环后性能没有发生漂移^[7-10],美国 Cincinatti 公司的 320×256 和 640×512 InSb 阵列芯片在 1999 到 2003 四年间,通过不断的设计优化,其循环工作次数由 2 000 次提高至 6 000 次,并且已形成比较完善的理论与技术体系^[11]。昆明物理研究所针对中波 320×256 HgCdTe 红外焦平面探测器开展了 2 000 次快速制冷的可靠性试验,光电性能变化不超过 10%^[12]。中国空空导弹研究院针对 InSb 焦平面探测器也开展了相应的可靠性工作^[13]。

文中选用小规模阵列制冷型 InSb 焦平面探测器样本进行高低温循环试验,分别对芯片、杜瓦以及制冷器的各项性能进行测试并分析,由此对 InSb 焦平面红外探测器的高低温循环可靠性开展研究。

1 高低温循环试验

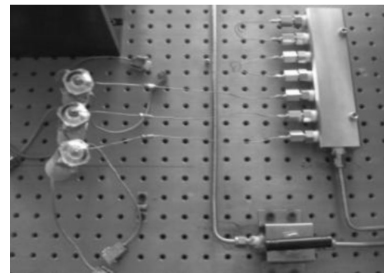
针对样本器件开展高低温循环试验。试验过程中每间隔一定的循环次数对器件进行光电性能、杜瓦漏热、制冷器特性等性能参数的测试和分析。试验

采用电磁阀自动控制高压氮气冲击的开关时间,高低温循环试验装置示意图及实物图见图 1,探测器示意图见图 2。



(a) 示意图

(a) Schematic diagram



(b) 实物图

(b) Picture

图 1 高低温循环装置

Fig.1 Illustration of thermal cycle experiment

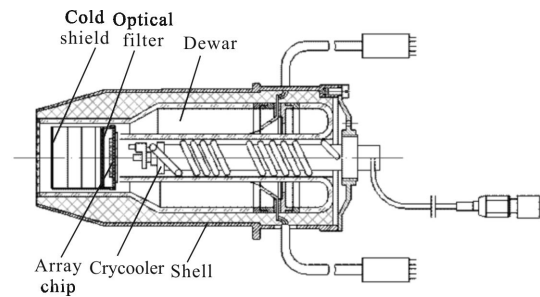


图 2 InSb 焦平面探测器示意图

Fig.2 Schematic diagram of InSb infrared focal plane array detectors

高低温循环试验需确定以下试验参数^[14]: 常温、工作温度、升温时间、降温时间、常温保持时间和工作温度保持时间。常温是红外整机系统器件在不工作时的环境温度约 300 K。工作温度是焦平面探测器正常工作时的温度, InSb 焦平面器件实际工作温度为 80 K。为了真实模拟器件使用情况,采用温度传感器实测器件从常温通气制冷至工作温度的时间、工作温度恢复至常温的时间确定升温时间和降温时间。高低温循环时,常温和工作温度保持一段时间的

目的是使得器件在特定温度充分浸泡,使缺陷处的应力作用累积到一定程度,以便潜在缺陷在有限的循环内尽快析出。综合以上因素,最终选取的高低温循环剖面如图 3 所示^[14]。

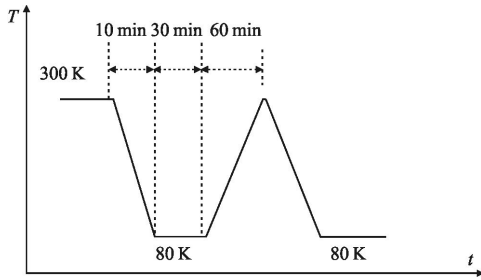


图 3 高低温循环剖面图

Fig.3 Profile of the thermal cycle

根据高低温循环剖面确定试验方法和步骤进行试验:抽取筛选合格的焦平面探测器进行光电性能检测、制冷器测试(启动时间、启动流量、稳定流量、蓄冷)和杜瓦热负载检测;通气 10 min 使探测器处于液氮温度,并继续通气 30 min,制冷器一共工作 40 min;之后停止通气,关闭制冷器,60 min 后器件恢复室温,如此循环。循环工作累计热冲击 2 000 次,分别在至 200、500、1 000、1 500、2 000 次时进行性能检测(器件光电性能、杜瓦漏热、制冷器性能)。

2 试验结果及分析

2.1 光电性能分析

试验过程中,分别在循环 200、500、1 000、1 500 和 2 000 次后进行响应率、探测率、盲元数和响应率非均匀性的测试,测试结果见图 4~图 7。

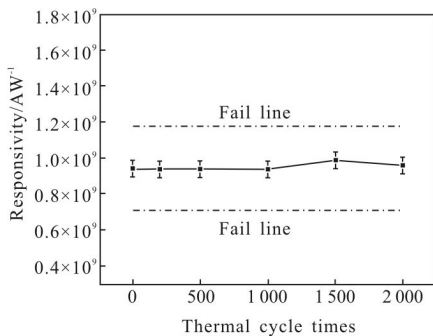


图 4 响应率随工作循环次数变化

Fig.4 Responsivity versus thermal cycle times

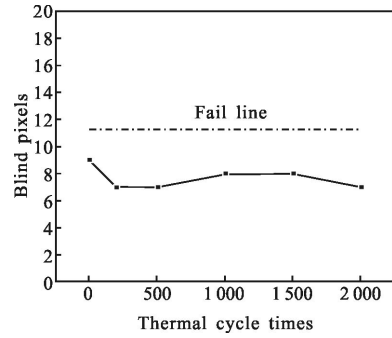


图 5 盲元数随工作循环次数变化

Fig.5 Blind pixels versus thermal cycle times

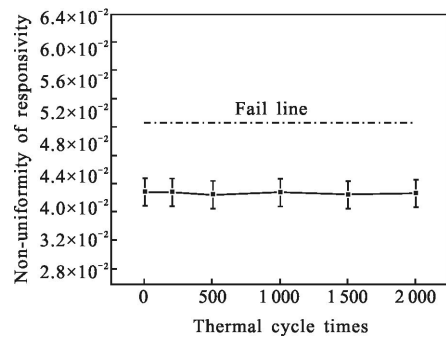


图 6 响应率非均匀性随工作循环次数变化

Fig.6 Non-uniformity of responsivity versus thermal cycle times

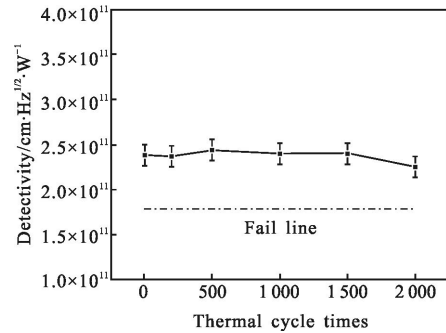


图 7 探测率随工作循环次数变化

Fig.7 Detectivity versus thermal cycle times

试验中参数性能下降 25%即判定为失效,其主要依据为《GB 2689.1-81 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则》^[15]和国外^[10]进行相关试验时的判定准则。

测试结果表 1 表明:各项光电性能指标波动幅度均远小于 25%,表明光敏芯片经历上千次的热冲击后性能良好。

盲元定义为响应率超过焦平面平均响应率±30%的像元,或者噪声等效温差(NETD)超过焦平面平均噪声等效温差 2 倍的像元。NETD 是目标温差与信噪比之比,主要受响应率和噪声影响。

表 1 光敏芯片参数的波动幅度

Tab.1 Fluctuation of the photosensitive chip's parameter

Photosensitive chip's parameter	Detectivity	Non-uniformity of responsivity	Responsivity	Blind pixels
Fluctuation	5.5%	0.08%	4.8%	-

从图 5 可知盲元数量有波动,盲元按波动情况分为固定盲元和波动盲元,固定盲元在每次测试时均出现,波动盲元并不是每次测试时都出现。通过对比测试数据发现,固定盲元既是响应率盲元又是 NETD 盲元,波动盲元仅属于 NETD 盲元。随机从波动盲元中选出一盲元,此波动盲元在初测、循环 1 000 次和循环 1 500 次时显示为 NETD 盲元,对比每次测试时此盲元的响应率、探测率、噪声、响应率非均匀性等各项指标,发现该像元呈现为波动盲元时,其噪声偏大。这一现象说明了影响波动盲元的主要因素为噪声,而不是响应率。

2.2 杜瓦漏热分析

试验所用的杜瓦为玻璃杜瓦,即杜瓦上套和冷指芯管下套均选用玻璃材料。杜瓦漏热一般用热负载来表征,热负载反映了杜瓦的绝热能力,是杜瓦的重要性能参数^[16]。为分析杜瓦性能是否发生变化,对热负载进行测定。其测定方法为在杜瓦内倒入一定量的液氮,采集液氮从 0.2~0.1 g 所需的挥发时间,根据公式 $Q \approx 1000 \cdot r \cdot \Delta m / \Delta t$,得到杜瓦热负载,其中 r 为液氮汽化潜热。图 8 所示为探测器热负载分别在循环 200、500、1 000、1 500 和 2 000 次后测试结果。

如图 8 所示,试验后杜瓦热负载下降的最大幅

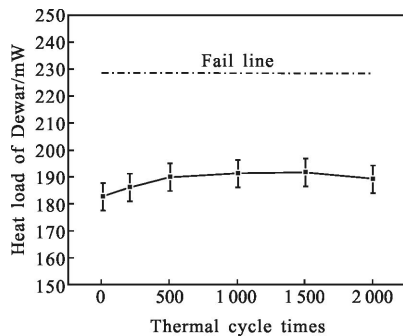


图 8 杜瓦热负载随工作循环次数变化

Fig.8 Heat load of Dewar versus thermal cycle times

度为 5%,远小于 25%,表明杜瓦经过 2 000 次高低温循环后性能良好。

2.3 制冷器特性分析

试验所用的制冷器为 J-T 制冷器^[17],是探测器的重要组成部分。测试了不同循环次数后器件的启动时间、启动流量、稳定流量和蓄冷时间,结果如图 9~图 12 所示。

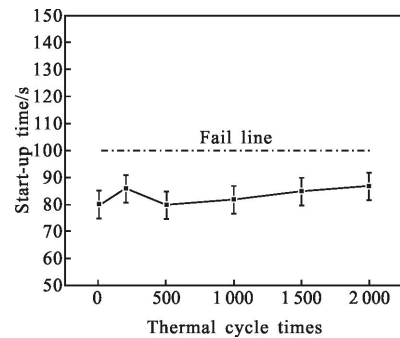


图 9 启动时间随工作循环次数变化

Fig.9 Start-up time versus thermal cycle times

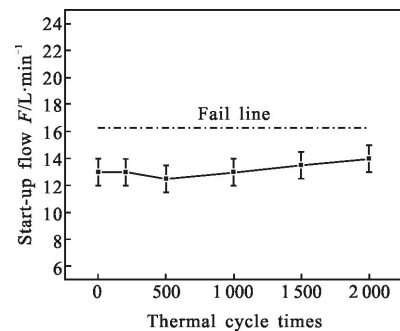


图 10 启动流量随工作循环次数变化

Fig.10 Start-up flow versus thermal cycle times

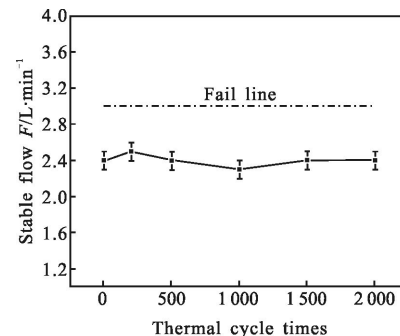


图 11 稳定流量随工作循环次数变化

Fig.11 Stable flow versus thermal cycle times

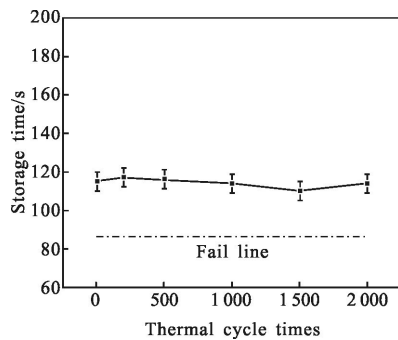


图 12 蓄冷时间随工作循环次数变化

Fig.12 Storage time versus thermal cycle times

测试结果表 2 表明: 制冷器各项参数性能下降幅度均远小于 25%, 表明制冷器经历上千次的热冲击后性能良好。

表 2 制冷器参数的波动幅度

Tab.2 Fluctuation of the cooler's parameter

Cooler's parameter	Start-up time	Start-up flow	Stable flow	Storage time
Fluctuation	8.8%	7.7%	4.2%	4.3%

由测试结果可知: 启动时间和启动流量同时有变大的趋势, 分析其原因可能有两种: (1) 探测器杜瓦热负载增加, 致使探测器启动时消耗氮气量增加并且时间增加; (2) 由测试误差导致, 启动时间和启动流量的测试受当时环境温度和瞬时气压影响较大。由之前的测试结果可知杜瓦热负载并无增加, 所以可以排除第一种可能, 认为启动时间和启动流量增加为测量误差。

3 结论

针对 InSb 焦平面探测器首次确定了高低温循环试验参数和试验方法, 选取样本探测器开展了 2 000 次循环试验, 测试和统计了试验过程中光电性能、杜瓦和制冷器的各项性能参数, 结果表明: 探测率变化的幅度 $\leq 5.5\%$ 、响应率非均匀性变化的幅度 $\leq 0.08\%$ 、响应率变化的幅度 $\leq 4.8\%$ 、盲元数未发生增加、杜瓦热负载变化的幅度 $\leq 5\%$ 、启动时间变化幅度 $\leq 8.8\%$ 、启动流量变化的幅度 $\leq 7.7\%$ 、稳定流量变化的幅度 $\leq 4.2\%$ 、蓄冷变化的幅度 $\leq 4.3\%$, 均远远小于失效判据 25%。试验结果证明所研制的焦平面探测器组件可以经受至少 2 000 次的高低温

循环考核。

参考文献:

- [1] Chen Xing, He Kai, Wang Jianxin, et al. Thermal cycling reliability of linear HgCdTe infrared detectors[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(4): 369-374. (in Chinese) 陈星, 何凯, 王建新, 等. 碲镉汞线列红外探测器模块温度循环的可靠性[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(4): 369-374.
- [2] Ge Baozhen, Li Chaowen, Ma Yunfeng, et al. Automatic centering of laser particle size analyzers based on four-quadrant construction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2384-2389. (in Chinese) 葛宝臻, 李文超, 马云峰, 等. 基于四象限探测的激光粒度仪自动对中技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2384-2389.
- [3] Wang Hongrui, Li Huiduan, Fang Wei, et al. Application and development of space sun sensors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 481-489. (in Chinese) 王红睿, 李会端, 方伟, 等. 航天太阳敏感器的应用与发展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 481-489.
- [4] Hu Xiaohua, Zhou Xiaozhong, Liu Songtao, et al. Spaceborne shimmer tridimensional imaging technology and its implementation[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 701-709. (in Chinese) 胡晓华, 周晓中, 刘松涛, 等. 星载微光立体成像技术及实现[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 701-709.
- [5] Wu Hanping. Research into testing scheme of reliability qualification of complex optoelectronic systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5): 112-120. (in Chinese) 吴晗平. 复杂光电系统可靠性鉴定试验方案研究[J]. 光学精密工程, 1997, 5(5): 112-120.
- [6] Liu Dafu, Wu Ligang, Xu Guoseng, et al. Reliability of long-wavelength PC HgCdTe IR detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 289-293. (in Chinese) 刘大福, 吴礼刚, 徐国森, 等. 长波光导 HgCdTe 红外探测器的可靠性[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 289-293.
- [7] Xavier Breniere, Philippe Tribolet. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance[C]//SPIE, 2008, 6940: 69400H.
- [8] Xavier Breniere, Alain Manissadjian, Michel Vuillermet, et al. Reliability optimization for IR detectors with compact cryo-cooler [C]//SPIE, 2005, 5783: 607591.
- [9] Xavier Breniere, Philippe Tribolet. IR detectors life cycle cost and reliability optimization for tactical application [C]//SPIE,

- 2006, 6395: 63950D.
- [10] Marianne Molina, Xavier Breniere, Philippe Tribolet. IR detector Dewar and assemblies for stringent environmental conditions [C]//SPIE, 2007, 6542: 65422N.
- [11] Davis M, Devitt J. Advanced FPA technology development at CMC Electronics[C]//SPIE, 2004, 5563.
- [12] Zhu Yingfeng, Han Fuzhong, Li Dongsheng, et al. MW 320×256 IRFPA detector under rapid cooling down [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1032–1036. (in Chinese)
朱颖峰, 韩福忠, 李东升, 等. 快速制冷启动的中波 320×256 红外焦平面探测器研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1032–1036.
- [13] Meng Chao, Peng Jing, Ma Wei. Study on reliability enhancement testing for InSb focal plane array detector[C]//SPIE, 2012, 8193.
- [14] Ren Ren, Wu Ligang, Wang Xiaokun, et al. Study on the thermal cycle characteristic of HgCdTe detector [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37: 941–943. (in Chinese)
任仁, 吴礼刚, 王小坤, 等. 碲镉汞红外探测器高低温循环特性研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37: 941–943.
- [15] The National Standard Office. GB 2689.1–81. The General Principle of Constant Stress Life Test and Accelerated Life Test[S]. Beijing: Standards Press of China, 1981. (in Chinese)
国家标准总局. GB 2689.1–81 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.
- [16] Wang Wujie, Liu Yongqiang, Zheng Bin. Research on Dewar heat leakage detecting technologies using infrared detectors [J]. *Journal of Test and Measurement Engtechnology*, 2008, 22(3): 222–224. (in Chinese)
王武杰, 刘永强, 郑宾. 红外探测器杜瓦瓶漏热测试技术研究[J]. *测试技术学报*, 2008, 22(3): 222–224.
- [17] Huang Shui'an, Liu Yongchun, Wang Wei. J–T cooler of InSb focal plane detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(6): 530–533. (in Chinese)
黄水安, 刘永春, 王巍. InSb 焦平面探测器的 J–T 制冷器[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(6): 530–533.