

国外红外焦平面探测器组件可靠性研究综述

张 莹, 刘 塑

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 介绍了国外焦平面探测器组件可靠性研究的主要特点和内容。焦平面探测器组件的主要制造商, 建立了较完善的可靠性保证体系, 可靠性研究融入设计与制造全过程, 是基于过程的可靠性研究。在研制阶段进行失效模式的充分暴露与加速试验研究; 批生产阶段进行工艺优化, 并降低系统成本; 建立数据库, 进行可靠性评估方法研究。

关键词: 焦平面探测器组件; 可靠性; 加速试验

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2012)03-0134-06

Reliability Research on Foreign Infrared Focal Plane Assembly

ZHANG Ying, LIU Su

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: This paper describes some reliability assurance practices for Infrared Focal Plane Array Detector Dewar Cooler Assembly (IDDCA) in foreign countries. Many IDDCA manufacturers have their own reliability assurance systems to obtain high reliability in the developing and manufacturing process. Their research includes exposing failure modes and accelerating tests in development phase, optimizing processes and life cycle cost during the manufacturing, and evaluating reliability of IDDCA relying on database.

Keywords: Infrared Focal Plane Array detector dewar cooler assembly, reliability, accelerating test

引言

红外热像仪在军事、航天、工业和医学等领域有着广泛的应用价值。在军事和航天领域, 红外热像仪的可靠性和全寿命周期费用成为关注的重点。红外探测器组件作为热像仪的核心, 对红外热像仪的可靠性和全寿命周期费用起决定作用。

国外从 20 世纪 70 年代末开始大规模、高投入地发展红外焦平面探测器, 以提升热像仪的性能, 90 年代初取得突破, 进入小批量生产, 90 年代末, 技术成熟, 进入大批量生产。红外焦平面探测器组件的可靠性研究, 融入设计与制造全过程, 体现了基于过程的可靠性研究。主要焦平面探测器组件制造商, 均建立了较完善的可靠性保证体系, 可靠性研究主要有以下几个方面: 研制阶段失效模式的充分暴露与加速试验研究; 批生产阶段工艺研究、优化和系统成本降低; 可靠性工程数据库和评估方法研究。

1 焦平面探测器组件可靠性研究

1.1 可靠性保证体系

可靠性保证体系从组织、管理和流程上, 规定产品可靠性的主要控制点、控制点的试验和检验, 体现了可靠性控制核心。红外焦平面探测器组件包括: 红外焦平面阵列、读出电路、微型杜瓦、制冷机等几个部件, 深入研究部件级和零件级的可靠性, 是红外焦平面探测器组件可靠性研究的共同之处^[1]。

美国 Superconductor Technologies Inc (STI) 超导技术公司, 组建设计开发、生产制造和质量、可靠性相结合的团队, 建立斯特林制冷机的可靠性控制流程如图 1 所示, 分三个阶段持续提高制冷机的可靠性水平。第一阶段: 设计开发阶段, 强调用可靠性设计获得制冷机的固有可靠性, 通过故障报告和纠正措施系统 (FRACAS), 实现设计 (再设计) 与试验—分析—改进 (即 TAAF 过程)。主要研究方法: 可靠性研制试验。第二阶段: 预生产阶段, 强调工艺设计和过程故障模式影响分析 (DFMEA 和 PFMEA), 分析工艺和制造过程中的薄弱环节, 改进工艺, 获得制造可靠性。DFMEA 和 PFMEA 是确定关键工序、关键工

收稿日期: 2011-09-06; 修订日期: 2011-11-12.

作者简介: 张莹 (1969-), 女, 浙江宁波人, 高级工程师, 从事红外探测器及热成像系统可靠性研究。Email: zy69122@sina.com

基金项目: 国防科技工业质量与可靠性专业技术基础科研计划项目。

艺参数、检测点、环境应力筛选等的关键。第三阶段：生产阶段，强调通过加速试验和验证试验，验证产品的环境适应性和可靠性水平。这三阶段通过成本分析，进一步优化设计和制造流程，实现可靠性与费用的权衡^[2]。

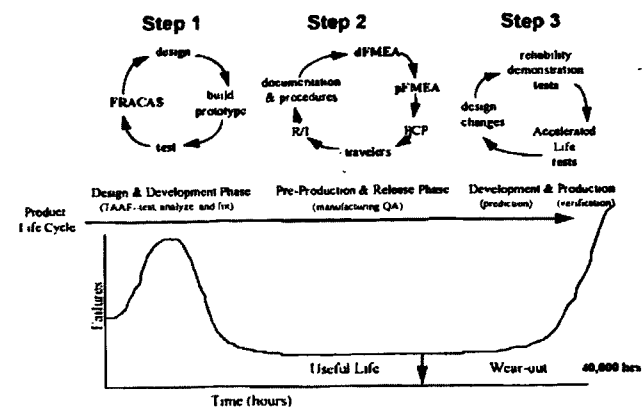


图1 STI公司斯特林制冷机可靠性控制流程

Fig.1 Cryocooler reliability program

Sofradir 公司是法国红外探测器组件研究机构，致力于二代、三代红外探测器组件的工业化生产研究，80年代中建立标准红外探测器组件(IDDCA)工艺线，通过DEFIR工程(Design of Excellence for the Future of IR)，从组织、管理、技术各方面实现探测器组件可靠性的增长和成本的降低^[3-5]。

Sofradir 公司可靠性保证体系强调设计和制造过程的可靠性研究和控制^[6]，包括：

1) 研究失效的发生：红外探测器组部件的失效是应力—强度问题的结果。当应力分布与强度分布交叠时，产生失效，如图2所示。

2) 强化设计：通过可靠性设计，增加产品“强度”，避免应力分布与强度分布交叠，提高设计可靠性，如图3所示。

3) 过程控制：减少强度分布伸展程度，即减小生产的可变性，避免应力分布与强度分布交叠，提高制造可靠性和成品率，如图4所示。

4) 建立数据库：收集可靠性试验、鉴定试验、环境应力筛选结果、内部研究结果、外场试验、售后及顾客反馈数据等，为设计提供依据。

1.2 研制阶段失效模式的充分暴露与加速试验研究

产品失效决定于一定的失效机理，即失效机理决定产品的可靠性，大多数情况下，导致产品失效主要取决于某几种失效机理。因此充分暴露工艺过程、储存、使用环境中的失效模式，研究失效机理是发现设计和工艺缺陷、改进设计和工艺、固化工艺的基础，加速试验是激发缺陷的有效手段^[7-9]。

1986年~1988年，SANTA BARBARA 研究中心

研究红外焦平面阵列(IRFPA)和读出电路的倒装互连工艺可靠性，通过从77 K到室温的温度循环识别失效模式和机理，研究内容包括钎柱的蠕变试验、温度循环对探测器I-V特性的影响、环境应力筛选等。温度循环有效地激发了由于表面污染、钝化而引起的互连失效，通过改进工艺提高可靠性^[10]。

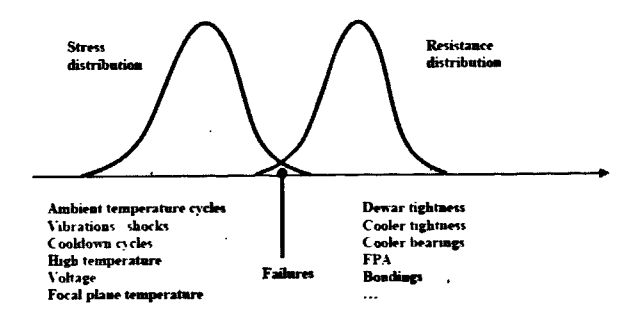


图2 红外探测器强度—应力曲线示意图

Fig.2 Resistance and constraints for a IR detector

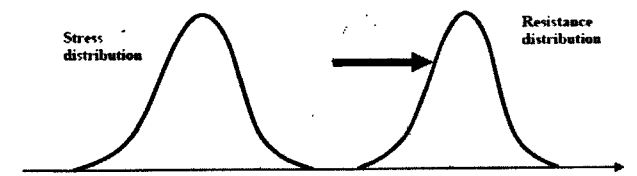


图3 增加产品“强度”

Fig.3 Increase of robustness

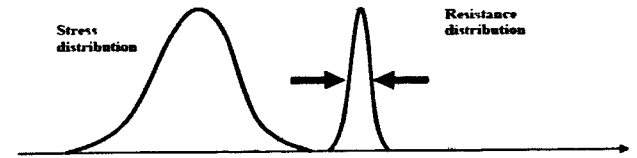


图4 减小“强度”分布的分散性

Fig.4 Spread reduction

1987年，Honeywell 公司颁布了“碲镉汞红外探测器可靠性技术和失效物理环境应力试验计划^[11]”，目的是确定探测器在混装和环境应力条件下，钎柱互连的失效机理，试验项目包括：温度循环、杜瓦烘烤、静态储存和倒装焊压力试验，倒装焊压力试验样品为10个32×32样片，其它试验项目的样品为2个240×8焦平面探测器和2个测试样片。

1) 温度循环试验：评价温度循环对光电二极管性能参数的影响。温度变化范围：80~300 K；循环次数：200次；测试参数：连通率、 R_0A 、I-V曲线、噪声、黑体响应率、光谱响应率和80 K的探测率。

2) 杜瓦烘烤试验：确保杜瓦的真空寿命。烘烤温度：71℃、85℃、100℃；烘烤时间：每个温度2周；测试参数：接触电阻和材料互扩散的相关参数。

3) 静态储存试验：确定储存温度对FPA的影响。

试验温度: 54.4℃; 储存时间: 2周~4周; 测试参数: 检测 FPA 性能的变化。

4) 倒装焊压力试验: 确定位错密度与 R_{0A} 的分布关系。压力范围: $2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6 \text{ g/cm}^2$ 。

Sofradir 公司将温度、振动和冲击作为可靠性加速试验的主要应力, 分析环境应力对杜瓦、制冷机、电连接、FPA 等功能模块特性参数的影响和可能产生的失效模式, 即 FMEA 分析, 确定各功能模块的主要失效模式^[12], 如表 1 所示。

根据 FMEA 分析结果, 结合使用环境要求, 设计焦平面探测器的加速试验, 以获得足够“健壮”的焦平面探测器^[12]。主要的加速试验包括:

1) 机械振动试验

机械部分的两种主要失效模式: 振动强度过大, 导致探测器损坏; 长时间的振动, 导致制冷机和杜瓦磨损。针对这两种主要失效模式设计了功能和耐久性随机振动试验, 评估杜瓦电连接、制冷机对振动的承受能力。表 2 列出了探测器的振动试验。

总结了防振设计准则: 设计的探测器固有频率越高, 则受使用环境的限制越小。

2) 机械冲击

对于空间应用领域, 要求冲击强度达 100 g 以上, 甚至达 500 g, 设计了冲击试验, 评估探测器对冲击的承受能力, 如: 40 g, 6 ms, 6000 次冲击。

3) 温度试验

高温环境主要涉及杜瓦的真空完整性和制冷机的寿命, 通过高温储存、高温工作、温度冲击等试验, 激发失效。

①高温储存试验:

为确定设计优化的效果, 不同生产线的探测器进行抽样, 进行高温储存试验, 包括: Pluton、Mercury、Venus、Mars LW、Mars MW、Scorpio, 参照标准: MIL-STD-810F。

检测参数: 热负载。

储存温度: 71℃, 80℃、90℃。

试验时间: 300 天, 80℃和 60 天, 90℃, 要求所有探测器热负载保持稳定。300 天, 80℃对应于 10 年 30℃真空寿命。

②温度冲击试验:

为确保杜瓦能够在严酷的环境中工作, 进行温度冲击试验。

检测参数: 真空完整性和制冷机特性参数, 如制冷时间。

温度范围: $-40^\circ\text{C} \sim +71^\circ\text{C}$, 冲击次数: 800 次。

③高温工作试验:

探测器能够在 95℃的高温环境中工作。

1.3 批生产阶段工艺研究、优化和系统成本降低

在生产过程中, 强调全过程以可靠性为中心的质量管理, 分析对产品可靠性、质量和成本起关键作用的环节, 改进批生产工艺, 简化、优化流程, 降低产品生产、筛选、维修总费用, 减少寿命周期总费用。批生产过程中, 应用加速试验激发批生产工艺缺陷, 研究失效模式和机理, 改进生产工艺, 并应用加速试验的结果, 制定(高)加速应力筛选规范, 对批生产产品进行 100%筛选, 消除产品中潜在缺陷, 提高产品制造可靠性。

AIM 公司通过 10 年的工程设计和生产, 对制造成本进行控制, 控制点为半导体材料的生长、FPA 工艺、制冷机组装、数据处理等, 在各控制点建立控制标准, 如体材料标准、混装工艺可靠性标准, 形成批生产能力, 从全系统角度优化 FPA 校正算法、制冷机接口, 提高可靠性^[13]。

DRS 公司在制冷机生产中, 实施 MANTECH 工程, 对制造技术进行改进并再次鉴定, 通过改进工艺降低制造成本, 使制冷机的 MTTF 达到 5000~6000h。MANTECH 工程对制冷机的改进包括^[14]:

1) 制冷机是系统中唯一有满负荷运动件的部件, 主要失效原因: 压缩机的磨损, 设计改进: 研发更耐磨的材料替代活塞;

2) 工艺流程改进: 改进工质气体的净化工艺、线性电机的制造、装配工艺, 引入更严格的检验和工艺规程, 严格过程控制。

3) 改进外部控制电路, 降低制冷机工作功率, 延长制冷机的寿命。

1987~1988 年间, Sofradir 公司对 CEA-LETI 公司的高成熟度的工艺进行批生产改进, 如: 背减薄工艺、集合倒装焊工艺, 成为标准 IDDCA 批生产关键工艺, 解决 ROIC 和 FPA 的热失配问题, 提高批生产成品率和产品一致性, 并简化了工艺流程^[3,15,16], 如图 5 所示。批生产标准 IDDCA 流程, 经十多年持续改进和优化, 生产战术和航天应用产品, 同时满足高可靠性和低成本要求, 并建立维修性与寿命周期费用分析模型, 对提高可靠性使成品率下降导致成本上升, 和提高可靠性使维修成本降低进行权衡, 提出基于全寿命周期费用(LCC)的可靠性要求^[6], 如图 6 所示。

分析所有提高可靠性的措施对制造成本的影响, 同时可靠性提高直接降低了工作和维修的费用, 降低了寿命周期费用, 图 6 中在频繁维修和不维修之间, 对寿命周期费用进行优化, LCC 和 MTBM 相关性下:

- 1 区: 系统维修太多, LCC 受限于维修费用;
2 区: 维修延长系统寿命周期, 这一时间的增加
 补偿维修工作的费用, LCC 得到优化。
3 区: 系统在探测器组件维修前故障, 维修不再
- 影响探测器 LCC, 而受限于系统的 LCC。这一区域
是校正维修区。用户等待失效和维修。对于 IDDCA,
总体上最大的维修成本是: 真空杜瓦退化导致制冷机
失效。

表 1 功能模块的主要失效模式
Table 1 Typical failure modes of the function module

环境应力	功能模块	影响的参数	失效模式
温度和热冲击	FPA	—	—
	真空杜瓦	—	漏气
	制冷机	制冷时间、制冷机控制功率、最大制冷功率	电机旋转速度
	电连接	—	焊点疲劳
机械振动	真空杜瓦	—	漏气
	制冷机	FPA 稳定性	疲劳、损坏
	电连接	—	疲劳、损坏
机械冲击	真空杜瓦	—	疲劳、损坏
	制冷机	—	疲劳、损坏
	电连接	—	疲劳、损坏

表 2 探测器可靠性加速试验——振动试验
Table 2 Vibration test-reliability test of detectors

试验	应力和频率范围	时间/h	结果
随机振动试验	12.2 grms、21.2 grms、32.3 grms 10~2000 Hz (用于制导系统探测器)	3	当应力达 32.3 grms, 每轴 1 h 的振动试验中, 没有功能失效, 仅有微小疲劳损伤。
耐久性随机振动	6 grms、20~2000 Hz (Pluton LW RM2)	90	在 90 h 的振动中, 制冷机的功耗保持稳定, 制冷机和杜瓦在耐久性振动中没有磨损
	6.9 grms、10~2000 Hz (Mars MW RM2)		

振动对噪声的影响: 通过对噪声图的分析发现, 振动前后噪声不改变, 性能稳定。

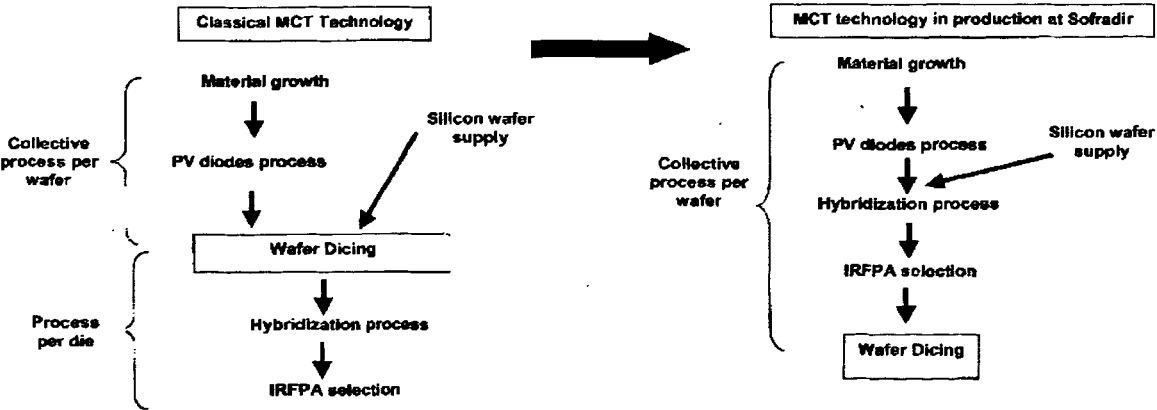


图 5 批生产标准 IDDCA 工艺流程图
Fig.5 A collective HgCdTe technology

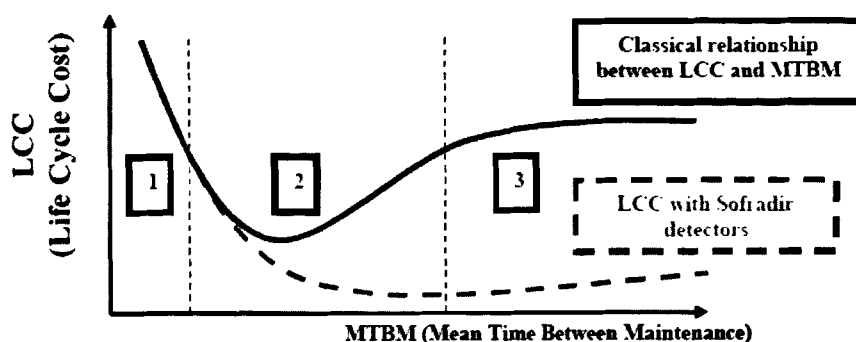


图6 寿命周期费用和 MTBM 关系图

Fig.6 Relationship between Life Cycle Cost (LCC) and MTBM .

1.4 可靠性工程数据库和评估方法研究

西方各国对探测器的可靠性评价都花费了大量的时间和经费。早期主要通过总结各种试验数据和现场使用数据进行评估。美军标第一代多元探测器规范中,规定了探测器的筛选要求,探测器/杜瓦和制冷机的可靠性指标为预计值,主要依靠试验数据和外场使用数据的积累验证可靠性指标^[17-20]。

随着可靠性物理和试验技术的发展,产品数据量的增加和批生产的稳定,后期普遍采用加速寿命试验,建立模型,建立可靠性仿真剖面,评价探测器的可靠性。

Thales 公司致力于全面提升制冷机产品的各项性能,并在设计阶段对制冷机的 MTTF 进行预计,然后对关键功能件进行加速寿命试验,建立模型进行预计。在设计初期,每一个关键部件需要 MTTF 数据,为解决机械产品缺乏失效率数据的问题,建立了制冷机内部不同功能失效点图表,收集相关寿命试验数据,这些数据用于新设计制冷机的 MTTF 预计,制冷机的加速寿命试验先确定加速模型,用几周时间等效于几千小时^[21]。

美国 SADA 通用组件系列是二代扫描型热像系统的标准组件,根据不同武器平台使用要求,形成系列化产品,规定接口控制要求。SADA 组件系列规定了可靠性试验剖面,通过验证试验评估 SADA 组件可靠性,验证试验如下:按照标准剖面规定的温度循环($-32^{\circ}\text{C}\sim+52^{\circ}\text{C}$ 温度循环,连续工作3天),制冷机交替工作,在每72h的循环中,制冷机工作60h,每400~500工作小时进行周期性能测试,检测漏率和振动输出^[22]。

Thales Cryogenics 在批生产水平进行加速寿命试验,评估制冷机的可靠性。每年最少抽样10台进行加速寿命试验,并根据不同使用要求,建立不同寿命试验剖面,寿命试验剖面由基本试验单元组合形成,

满足不同失效模式数学模型建立的需要^[23]。

1) 环境温度 20°C 加速寿命剖面 (A20): 该剖面制冷机以高速工作(接近最大速度),试验时间:24h。

2) 环境温度 70°C 加速寿命剖面 (A70): 该剖面制冷机以高速工作(接近最大速度),试验时间:24h。制冷机上风扇吹风,保持制冷机表面温度在技术规范要求范围内。

3) 储存温度 20°C 剖面 (S20): 该剖面制冷机不工作,保温时间:24h。

4) 储存温度 70°C 剖面 (S70): 该剖面制冷机不工作,保温时间:24h。

5) 使用振动剖面 (V20): 根据制冷机技术规范振动要求,在 A20 剖面进行加速寿命试验。

Sofradir 依靠可靠性数据库,自1993年积累了大量数据,提出了用于产品可靠性寿命试验的使用剖面,从而使探测器可靠性的预计、评估日益准确^[5]。以下是定义的使用剖面:

剖面1(监控系统):地面固定环境 30°C , 2000 h/年工作时间; (GF30)

地面固定环境 20°C , 6760 h/年贮存时间; (GF20)
400次制冷/年。

剖面2(手持系统):地面固定环境 40°C , 500 h/年工作时间; (GF40)

地面移动环境 20°C , 500 h/年贮存时间; (GM40)
地面固定环境 20°C , 7760 h/年贮存时间; (GF20)
500次制冷/年。

剖面3(空用系统):战斗机无人舱环境 50°C , 300h/年工作时间;

战斗机无人舱环境 50°C , 1000 h/年贮存时间;
地面固定环境 20°C , 7460 h/年贮存时间; (GF20)
600次制冷/年。

2 总结

国外焦平面探测器的可靠性研究有以下特点:

1) 在设计和研制阶段,大量应用高加速寿命试验发现设计、工艺缺陷,为改进设计提供信息,是设计(再设计)与试验—分析—改进过程(即 TAAF 过程)相结合的反复迭代的过程,把可靠性加速试验作为强化设计的一种有效手段。

2) 在批生产阶段,应用 HALT 发现工艺缺陷,为改进工艺提供信息,在 HALT 分析基础上,确定批生产的环境应力筛选(ESS)或高加速应力筛选(HASS),剔除早期失效,提高探测器可靠性。

3) 基于过程的可靠性研究是动态的。研制阶段,设计和工艺缺陷较多,改进后失效机理不复出现或对加速应力的敏感程度不同,对可靠性的影响也有改变,所以不同厂家的探测器,因采用不同设计和工艺,其可靠性模型不可完全通用,只有基于产品失效机理的可靠性模型,才能较好反应产品的可靠性。

4) 基于过程的可靠性研究具有持续性,研制阶段失效机理的深入研究,对批生产阶段稳定工艺、固化工艺、提高成品率有指导作用,是可靠性评估的基础,探测器的可靠性研究,只有在研制阶段同步深入开展,才能在批生产阶段较好选择 ESS 的应力,提高制造可靠性,降低成本。

借鉴国外研究方法开展基于过程的焦平面探测器组件可靠性研究极为重要。在小批量生产阶段,深入分析焦平面探测器组部件的失效模式,通过加速试验充分暴露设计和工艺缺陷,改进设计和工艺,建立可靠性模型,通过大量的过程数据,修正模型,为焦平面探测器组部件的可靠性预计和高层次产品可靠性预计提供依据,同时实现焦平面探测器组件的可靠性增长管理,为大批量生产进一步提高制造可靠性和降低成本打下基础。

参考文献:

- [1] GR-468-CORE. Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used In Telecommunications Equipment, 1998
- [2] V. Loung, A. O Baid, and S. Harper. Path to Low Cost and High Reliability Stirling Coolers[J]. *Cryocoolers*, 1997, 9: 97-108.
- [3] Philippe Tribolet, Jean-Pierre Chatard. From research to production: 10 years of success[C]//*proc.SPIE*, 2000, 4130: 422.
- [4] P Costa, P Tribolet. Recent results on Sofradir HgCdTe detectors. Institute of Physics. NUMB, 2006, 187: 405-412,
- [5] Xavier BRENIERE, Alain MANISSADJIAN. Reliability optimization for IR detectors with compact cryo-coolers[C]//*SPIE ORLANDO*. 2005: 5783-21.
- [6] Xavier BRENIERE, Philippe TRIBOLET. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance[C]//*SPIE*, 2008, 6940: 69400H.
- [7] 陈循, 陶俊勇, 张春华等. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. *国防科技大学学报*, 2002, 24(4): 29-33.
- [8] 祝耀昌, 王宇宏. 高加速应力试验及其与传统试验的比较[J]. *装备环境工程*, 2006, 3(4): 16-19.
- [9] 祝耀昌. 可靠性试验及其发展综述[J]. *航天器环境工程*, 2007, 24(5): 261-269.
- [10] Per W. Schmidt. NRL Hybrid Reliability Physics Of Failure Initial Study. ADA217986. 1990
- [11] Hybrid PV HgCdTe IR Detectors Technology Reliability and Failure Physics Program-Environmental Stress Testing Plan. ADA191165.1987
- [12] Marianne MOLINA, Xavier BRENIERE. IR detector dewar and assemblies for stringent environmental conditions[C]//*SPIE Orlando*. 2007: 6542-85.
- [13] H. Korf, W. A. Cabanski, J. Wendle. IR Modules and long-life Stirling Cryocoolers at AIM[C]//*SPIE*, 1998, 3436: 375-386.
- [14] Garin S. Tate. Linear-Drive Cryocoolers for the Department of Defense Standard Advanced Dewar Assembly (SADA)[C]//*SPIE*, 2005, 5783: 138-144.
- [15] Daniel Zenatti and Patrick Radisson. MCT TDI Arrays Producibility[C]//*SPIE*, 1994, 2228: 249-261.
- [16] Jean-Luc Tissot, François Marion. Collective flip-chip technology for hybrid focal plane arrays[C]//*SPIE*, 2000, 4130: 581-586.
- [17] MIL -D-49172A(CR). DETECTOR-DEWAR, DT-594/UA, 1982
- [18] MIL-D-49419(ER). DETECTOR-DEWAR DT-617/UA, 1982
- [19] MIL-C-49175B(CR). COOLER, CRYOGENIC, MECHANICAL HD-1033B/UA AND HD-1033C/UA, 1982
- [20] MIL-C-85300(AS). COOLER,CRYOGENIC DETECTOR, 1982
- [21] Tonny Benschop, Willem van de Groep. Improvements and extensions in Thales Cryogenics product portfolio[C]//*SPIE*, 2007, 6542: 65422J-1-7.
- [22] W.E. Salazar. Report on the Status of Linear Drive Coolers for the Department of Defense Standard Advanced Dewar Assembly (SADA)[C]//*SPIE*, 2003, 4820: 43-51.
- [23] Xavier BRENIERE, Philippe TRIBOLET. IR detectors life cycle cost and reliability optimization for tactical applications[C]//*SPIE*, 2006, 6395: 63950D-1-12.