

热应力加速试验评定碲镉汞焦平面阵列像元储存寿命

李建林, 张绍裕, 孙娟, 谢刚, 周嘉鼎, 马颖婷

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 高可靠性长寿命碲镉汞焦平面阵列像元性能参数慢慢变差退化失效, 确定它的储存寿命要用 B 类试验缩短试验时间。有效加速寿命试验 ALT 或加速退化试验 ADT 的恒定热应力, 应大于高温+90 °C、2 160 h。定量加速试验前, 应进行高加速应力筛选试验 HASS 迫使缺陷发展, 以暴露可能存在的早期故障。根据碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦组件高温储存试验性能退化测试数据, 用统计模型对在恒定高温应力水平下获得的失效时间或退化特征性能参数进行转换, 得到在+25 °C 额定应力水平下的储存寿命大于 50 年。超过 3 000 h 高温储存试验结果表明, 残余工艺应力释放导致试验前 1 500 h 像元性能有向好的趋势, 在高温+80 °C 的真空环境下烘烤 20 天不会造成明显的像元性能恶化。

关键词: 红外探测器; 碲镉汞; 加速退化试验; 储存寿命; 可靠性

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1004003

Evaluating its storage life using thermal stress accelerated HgCdTe FPA performance degradation

Li Jianlin, Zhang Shaoyu, Sun Juan, Xie Gang, Zhou Jiading, Ma Yingting

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: HgCdTe FPA pixel performance of high-reliability and long-life is worse, degraded and failed over time in service life. To determine its storage life, the test time should be shortened by class B test, the constant stress of ALT or ADT should be greater than that of high temperature +90 °C, 2 160 h. The high acceleration stress screening test HASS should be forced to develop the defect to expose the possible early failure before the quantitative acceleration test. According to the high temperature storage test performance degradation test data of the HgCdTe FPA Dewar assembly, the statistical model was used to convert the failure time or performance parameter degradation characteristics. The storage life was greater than 50 years under rated stress level at +25 °C. More than 3 000 h the high temperature storage test results show that the pixel performance tends to be better before 1 500 h because residual technological stress is released. Baking for 20 days in a vacuum environment of high temperature +80 °C does not cause deterioration of pixel performance.

Key words: infrared detectors; HgCdTe; accelerated degradation test; storage life; reliability

收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-07-21

作者简介: 李建林(1963-), 男, 高级工程师, 主要从事红外探测器封装和测试技术方面的研究。Email: lijianlin12@21cn.com

0 引言

碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦制冷机组件要求具有长寿命、可靠性水平高的特征,而碲镉汞焦平面阵列在使用环境和剖面中潜在的性能退化速度非常缓慢,评定和考核它的寿命指标必须要用加速试验方法,通过提高试验的应力水平或者增大交变应力施加的频度而缩短试验时间,利用高应力水平下的性能退化数据预测和估计常规应力下的寿命(失效时间)和可靠性水平,寿命包括工作寿命、温度循环寿命和储存寿命。美国 Santa Barbara 研究中心、Honeywell 公司、Boeing 公司和法国 Sofradir 公司在 20 世纪八九十年代,先后开展碲镉汞红外探测器可靠性技术和失效物理研究^[1-4],采用 Pieruschka 1961 年提出的加大试验应力来缩短试验时间的加速寿命试验方法,通过收集获取的截尾失效数据和寿命分布信息,进行统计分析评定寿命^[5]。1981 年, Nelson 给出了加速退化试验得到的性能退化数据的统计模型与分析方法,利用性能退化轨迹评定寿命^[6]。

加速试验技术的文献专著很多,GB/T 34986-2017《产品加速试验方法》等同采用国际电工委员会 IEC 62506: 2013 标准,用它指导碲镉汞焦平面阵列的加速试验,应考虑试验应力水平、试验时间、试验结果、试验结果的可信度、对有用数据的分析、寿命周期费用影响、分析的复杂性等因素。工程应用中针对具体产品的加速模型、失效机理和试验设计,仍然依赖经验和假设。诸如加速系数、激活能、失效分布、不同应力下时间折算模型等需要深入研究其适用范围。加速试验不仅提供评定寿命分布和可靠性指标的信息,也是识别制造工艺缺陷(潜在故障模式)、研究失效机理、分析性能退化的有效途径^[7-10]。

有效加速试验,一般需要样本 30~60 个,要求失效数至少 5 个。按威布尔分布评估寿命至少需要出现 5~10 个样本失效,需要的样本量应该为 15~30 个。如果不能确定寿命的分布,当要求 5% 的样本量失效,至少需要 30 个样本进行试验。试验时间的长短取决于试验中允许出现多少个故障,最小试验时间是要求的可靠性水平、施加的应力和试验加速的函数。因此,验证碲镉汞焦平面阵列像元储存寿命的试

验昂贵费时。根据现有恒定高温试验数据,用加速寿命试验(Accelerated Life Test, ALT)和加速退化试验(Accelerated Degradation Test, ADT)方法,对试验数据进行处理评定碲镉汞焦平面阵列像元储存寿命。288×4 LW 样件 LS1~LS6 经历高温+71 ℃、1 507 h 和+85 ℃、2 778 h 步进应力储存试验,320×256 MW 样件 MS1~MS3 经历高温+80 ℃、25 次累积 3 300 h 恒定应力储存试验。

1 退化特征性能参数与失效判据

退化量测量值与真值存在差异,其测量方程为:

$$z(t)=x(t)+\varepsilon \quad (1)$$

式中: ε 为测量误差; $z(t)$ 是退化量的实际测量值; $x(t)$ 为真实值, t 是测量时间。一般假设误差平均值 $E[\varepsilon]=0$ 、方差 $\text{Var}[\varepsilon]=\sigma^2$,且 ε 与 $x(t)$ 独立。通常可信的性能评价测量系统,其置信度至少达到 80% (20% LTPD 容许缺陷度),是检测识别失效的有效途径,其重复性与再现性需要经过试验检验。

表征红外焦平面阵列的特性参数很多,不同应用系统关注的特性参数不尽相同。对于防御系统所作的测量有 D^* 、线性度、动态范围、响应率的非均匀性等,针对科学应用的参数还有光谱量子效率、均匀性、线性、暗电流等。通常,在近距扩展源(浸没)模式下测量响应率 R 、探测率 D 、响应率不均匀性 UR 、线性度、像元噪声电压 V_n 、噪声等效温差 NETD、噪声等效辐照功率 NEP、有效像元率 N_{ef} 等,在聚焦模式下测量串音、点扫描、调制传递函数 MTF 等。这些特性参数归结为两种均匀辐照条件下的信号电压测量,即背景辐照或背景辐照加黑体辐射源的均匀辐照条件下的信号电压测量。在测得背景信号电压和黑体信号电压后,所有特性参数可根据定义函数模型计算得到。所以,响应率和噪声的测量极为重要,这些测量存在的误差将导致计算其他参数的误差。信号电压为:

$$V_s(i, j)=R(i, j)P(i, j) \quad (2)$$

式中: $R(i, j)$ 为第 (i, j) 像元的响应率; $P(i, j)$ 为面黑体辐射源投射到第 (i, j) 像元的已知辐射功率。GB/T 17444-2013《红外焦平面阵列参数测试方法》规定了响应率、噪声电压和噪声等效温差等性能参数的测量方法。热成像系统的信号电压以灰度等级在显

示器上显示出热图像, 未经过非均匀性校正的热图像直观地呈现出红外焦平面阵列的初始无效像元(亮点、暗点)和响应率不均匀性, 即使经过非均匀性校正出厂合格的热成像系统, 也能反映出长期使用过程中像元响应率、噪声的变化, 以及新产生的无效像元。

热成像系统的最小可分辨温差 MRTD 递增退化到某一门限值, 即包括人眼特性在内的系统空间分辨率和热灵敏度的噪声门限值, 使得热图像不能满足规定探测、识别和搜索用途使用需求。噪声等效温差 NETD 是热成像系统灵敏度的主要性能指标, 它是大目标(线尺寸至少 10 倍于像元立体角截取的线尺寸)和背景之间的温差, 探测器的 NETD 和系统的 NETD 是同一个概念, 焦平面阵列性能指标的 NETD 表示输出信号等于噪声信号方均根值时入射辐射的温度变化, 即在微小温度 ΔT 时噪声电压与信号电压 ΔV_s 对 ΔT 曲线斜率之比^[11]。

$$NETD = V_n \frac{\Delta T}{\Delta V_s} \quad (3)$$

式中: ΔT 是目标与背景之间的温度差; V_n 是噪声电压; ΔV_s 是温度差 ΔT 时测量出的电压信号变化。

由于使用过程中碲镉汞焦平面阵列结构、材料和工艺等固有的潜在缺陷被激发, 引起像元信号电压、像元噪声电压随工作或非工作使用时间的延长而缓慢地发生变化, 因此将反映像元光电转换功能下降的计量特性指标值称为退化量。当焦平面像元的光电转换功能或电学特性参数、物理参数达不到设计与用户规定指标的要求, 即发生退化失效。退化失效发生与否是通过退化量阈值(退化失效临界值)规定的失效标准来判定, 失效判据是质量和可靠性的指标。

盲元率是表征热成像系统热图像或红外焦平面阵列无效像元程度的参数。GB/T 17444-2013 定义盲元率为无效像元数占总像元数的百分比。无效像元包括像元响应率小于平均响应率(或者像元响应电压小于平均响应电压)1/2 的死像元和像元噪声电压大于平均噪声电压 2 倍的过热像元。红外焦平面的像元总数扣除无效像元后, 称为有效像元数。有效像元数占像元总数的百分比, 称为有效像元率。法国 Sofradir 公司将噪声等效温差大于平均值 2 倍、响应

率超出平均值 $\pm 30\%$ 、漏电流超过平均值 30% 的像元定义为无效像元; 德国 AIM 公司规定噪声等效温差大于平均值 2 倍、响应率小于平均值 50% 或者大于 1 倍、噪声电压大于平均值 5 倍的像元为无效像元^[12]。失效判据为盲元率 1% 或无效像元数保持稳定^[4]。

2 像元性能退化失效机理

碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦制冷机组件的使用状态应力剖面见图 1, 包括使用地域自然环境温度随机应力下工作或非工作。工作时碲镉汞焦平面阵列从自然环境温度制冷到低温 80 K 工作温度, 结束工作碲镉汞焦平面阵列从工作温度升温恢复到自然环境温度, 寿命期内经历数千甚至上万次的工作温度循环; 非工作时储存在自然环境温度下, 由于昼夜温差、日年温度随机性, 使得温度呈周期性和随机性, 某地年温度变化幅值最大 34 °C、循环次数 43 次, 其等效试验应力剖面低温 +12 °C 25 天、高温 +28 °C 36 天、共 6 个循环^[13]。在寿命期 10 年内有 60 个循环, 可以等效为 +20 °C 的恒定温度应力。

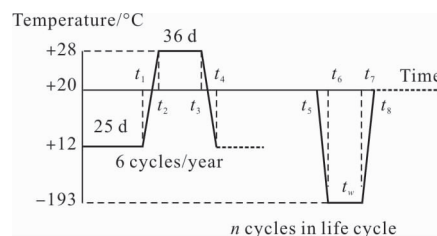


图 1 寿命期应力剖面

Fig.1 Lifetime stress profile

自然环境应力下工作或非工作使用过程中, 可能存在碲镉汞表面污染杂质扩散、碲化镉/碲镉汞界面生成缺陷、碲镉汞材料中的汞原子逸出和扩散的现象发生, 影响表面漏电流和热稳定性质。碲镉汞的热稳定性较差, 如汞、镉金属在室温下蒸气压大于 10^{-9} Pa, 其中汞原子比镉原子及碲原子更容易挥发。当温度 50 °C 时, 碲镉汞中的汞原子即会逸出。在 100~200 °C 的真空环境下, 汞原子只需要几分钟即从表面扩散出来; 在室温真空环境下, 汞耗尽也会以一个较慢的速率发生^[14]。经过碲化镉表面钝化的碲镉汞光敏二极管, 在 80 °C 的真空环境下, 烘烤 10 天会在碲化镉/碲镉汞界面额外生成缺陷, 并使 p-n 结性能恶化。沉积碲化镉钝化层后, 在汞蒸气压和 220 °C

温度下退火,能够抑制烘烤中界面缺陷的生成,稳定碲镉汞光敏二极管的性能^[15]。恰当的表面钝化工艺能够获得更好的热稳定性。制造真空环境下具有较高烘烤温度的碲镉汞焦平面阵列,是一个实践性很强的工艺技术问题。

像元信号电压、像元噪声电压随工作或非工作使用时间的延长而缓慢地发生趋势性变化,它们与吸收系数、量子效率等材料的物理参数有关。碲镉汞的电子和光学性质取决于布里渊区的带隙结构,与合金材料的组分参数 x 密切相关。少数载流子迁移率是基本的材料参数,包括载流子浓度、成分和少数载流子寿命,它影响碲镉汞性能。吸收系数表征碲镉汞的光学性质,与材料的固有缺陷和杂质浓度、不均匀的成分和掺杂、材料厚度不均匀、机械应力及表面处理方式有关^[11]。这些引起碲镉汞焦平面阵列性能退化的因素,主要是器件结构、材料和工艺中的潜在缺陷被激发,导致像元的响应率、噪声发生变化。像元噪声电压受 p-n 结的暗电流和由此产生的噪声电流限制,有漂移-扩散、产生-复合、陷阱辅助隧道、带间直接隧穿和表面漏电等暗电流机制。碲镉汞焦平面阵列中存在由材料、器件工艺过程引入的残余应力和材料、结构特性导致热适配的热应力,这些应力影响碲镉汞材料位错密度、导致暗电流变化,使得表面和结区的缺陷密度增加,增大陷阱辅助隧穿电流,使碲镉汞焦平面像元的光电转换性能发生变化^[12]。

3 单应力加速试验模型

在使用和储存过程中的失效模式与潜在的性能退化过程有关,碲镉汞焦平面阵列像元光电转换功能退化是材料、p-n 结性能变化所致,是环境应力激发原子、分子变化的长期累积效应,这些物理化学变化的速率受限于环境应力的大小。环境应力为温度时,温度对性能退化量的影响符合反应论阿伦尼斯(Arrhenius)经验模型^[16]。

$$\frac{\partial z(t)}{\partial t} = A_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4)$$

式中: $\frac{\partial z(t)}{\partial t}$ 为性能退化速率; t 为经历时间; A_0 为常数; E_a 为像元失效机理的激活能,eV; k 为 Boltamann 常数, 8.617×10^{-5} eV/K; T 为温度应力,K。对公式(4)积

分,在自然环境温度 T_{use} 、高温试验温度 T_{stress} 下,经历时间 t_u 、 t_s 后性能退化量相同,推导得加速方程:

$$AF = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right] \quad (5)$$

式中: AF 为加速系数。在加速试验应力 T 作用下,退化特征参数随时间的变化规律(轨迹)符合线性方程 $z(t) = at + b$,则激活能可由公式(4)、(5)求得。

$$E_a = \frac{T_{s1} T_{s2} k \ln(a_1/a_2)}{T_{s1} - T_{s2}} \quad (6)$$

式中: T_{s1} 、 T_{s2} 是恒定或者步进加速试验应力,K; a_1 、 a_2 分别为由试验过程中检测获取的退化特征参数拟合得到退化轨迹方程的斜率。

加速试验的基本假定是:常规应力与加速应力下的寿命服从同簇的失效分布,即改变应力水平不改变失效分布,仅仅改变分布参数。设 $F_s(t_s)$ 、 $F_u(t_u)$ 分别是应力 T_{stress} 、 T_{use} 下的累积失效概率, t_s 、 t_u 是试验时间和使用时间,当 $F_s(t_s) = F_u(t_u)$ 时,试验应力 T_{stress} 相对于常规应力 T_{use} 的加速系数为:

$$AF = \frac{t_u}{t_s} \quad (7)$$

所以,加速系数是与试验时间无关的常数,由试验应力决定。有效加速试验,必须保证各种应力水平下的失效机理与常规应力下的失效机理一致不变,这就需要满足加速系数不随试验时间变化的原则。

4 热应力加速试验评定寿命

4.1 恒定应力加速寿命试验 ALT

加速寿命试验的统一定义最早由美罗姆航展中心于 1967 年提出^[17],加速寿命试验是在进行合理工程及统计假设的基础上,利用与物理失效规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境下获得的可靠性信息进行转换,得到产品在额定应力水平下可靠性特征可复现的数值估计的一种试验方法。美国 Boeing 公司用高温+70、+80、+90、+100 °C 恒定应力加速寿命试验,研究碲镉汞焦平面阵列像元的失效符合阿伦尼斯模型,退化激活能 0.76 eV,外推至 25 °C 条件下的储存寿命为 20 年^[3];Sofradir 公司也开展了高温+90 °C、90 天恒定应力加速寿命试验,计算得到碲镉汞焦平面阵列在 30 °C 条件下的储存寿命超过 30 年^[4]。

碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦组件加速试验应力剖面见图 2。样件 LS1、LS2、LS3 在测量时间集 {T1, T2, T3, T4}, 样件 LS4、LS5、LS6 在测量时间集 {T1, T4}, 分别进行性能评价测量。用像元响应率小于平均响应率 1/2、像元噪声电压大于平均噪声电压 2 倍和像元噪声等效温差大于平均值 2 倍甄别无效像元, 试验结果可视化如图 3 所示。样件 LS1、LS2、LS3 没有死像元, 只有过热像元; 样件 LS4、LS5、LS6 既有死像元, 也有过热像元。在步进应力试验过程中, 失效像元的数量、位置和分布特征也随之改

变, 失效像元位置呈现随机性, 甚至有试验前失效的像元试验后不失效。

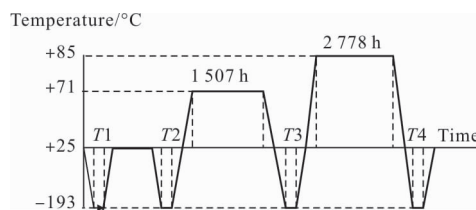


图 2 加速试验应力剖面

Fig.2 Accelerated testing stress profile

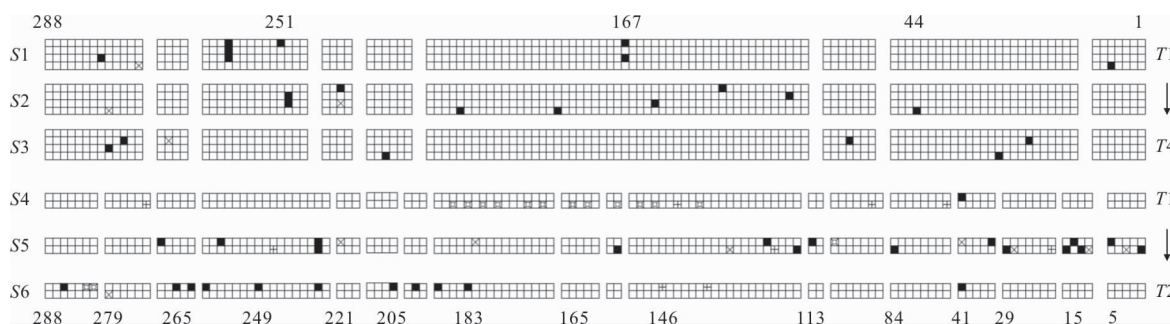


图 3 无效像元位置示意图 (■=x+ >2NETD +>2V_n <R_p/2)

Fig.3 Non-effective pixel location diagram

假设试验样件的寿命服从指数分布, 采用 Boeing 公司的退化激活能 0.76 eV 计算 α 置信水平下像元在常温环境 (+25 °C) 的储存失效率单边上限, 像元储存失效率为:

$$\lambda_U = \frac{\chi_2^\alpha (2r+2)}{2 \cdot ss \cdot AF \cdot t} \quad (8)$$

式中: λ_U 为像元储存失效率; χ_2^α 为分布的 α 分位数, α 是置信水平, 取值 0.9; r 为储存试验中失效像元的总数, 它等于试验前的初始无效像元数 N_1 与试验结束后的无效像元数 N_2 之差; ss 为总像元数; t 为累积试验时间等于样本量与单个样本试验时间的乘积。用初始盲元率 B_{ir} 、盲元率失效判据 B_{th} (盲元率 1% 或实测盲元率)、像元储存失效率评定碲镉汞焦平面阵列像元储存寿命为:

$$t_{storage} = \frac{B_{th} - B_{ir}}{\lambda_U} \quad (9)$$

依据公式 (5)、(7)~(9) 对性能评价测试数据处理得表 1。

按高温 +71 °C 储存定时截尾试验, 样件 LS1 (盲元率 1.04%) 评估得储存寿命 16 年, 样件 LS2 无失

效, 样件 LS3 无效像元减少 2 个。按高温 +85 °C 储存定时截尾试验, 样件 LS1 无效像元减少 2 个, 样件 LS2 (盲元率 1.04%) 和 LS3 (盲元率 0.69%) 评估得储存寿命 86 年。样件 LS4~LS6 经历高温 +71 °C 和 +85 °C 累积储存定时截尾试验, 按 +85 °C 的加速系数 143、2 778 h 和实测盲元率, 由失效率评估得样件 LS4 (盲元率 5.56%) 的储存寿命 66 年, 样件 LS5 无失效, 样件 LS6 无效像元减少 14 个。样件 LS6 试验前有 15 个无效像元, 试验后有一个由 NETD 判据确认的无效像元。样件 LS1~LS3 合并为 3×288 像元输出通道 (盲元率 0.69%), 按加速系数 143、试验时间 2 778 h 评估得储存寿命 86 年; 样件 LS1~LS6 合并为 6×288 像元输出通道 (盲元率 1.97%), 加速系数 143、试验时间 2 778 h 评估得储存寿命 82 年。

样件 MS1、MS2、MS3 试验前无效像元数 {58, 79, 81}, 试验后无效像元数 {54, 505, 446}, 试验中失效像元数 {-4, 426, 365}, 按 +80 °C 储存定时截尾试验评估样件 MS2 (盲元率 0.62%)、MS3 (盲元率 0.54%) 的储存寿命为 40 年、41 年, 其中 MS1 试验后无效像元数减少了 4 个。

表 1 定时截尾实测盲元率和失效率评定像元储存寿命

Tab.1 Timing censoring measured blind element rate and failure rate evaluation cell storage life

		LS1	LS2	LS3	LS4	LS5	LS6	LS1-3	aveLS1-3	staLS1-3	LS1-6
T1	Over hot pixel number	3	2	0	1	10	13	5	1.67	1.25	29
	Dead pixel number	0	0	0	0	1	2	0	0	0	3
	Blind element rate	1.04%	0.69%	0	0.35%	3.82%	5.21%	0.58%	0.58%	0.43%	1.83%
	Elapsed time/day	0	0	0	0	0	0	-	0	0	-
T2	Over hot pixel number	1	2	3	-	-	-	6	2	0.816	-
	Blind element rate	0.35%	0.69%	1.04%	-	-	-	0.69%	0.69%	0.28%	-
	Blind rate increase rate	-66.67%	0	1.04%	-	-	-	20%	-21.88%	31.67%	-
	Elapsed time/day	19	8	29	286	103	61	-	19	19	-
	Blind element degradation/day ⁻¹	-3.51%	0	3.59%E-2	-	-	-	-	-1.16%	1.66%	-
T3	Over hot pixel number	3	2	1	-	-	-	6	2	0.816	-
	Blind element rate	1.04%	0.69%	0.35%	-	-	-	0.69%	0.69%	0.28%	-
	Blind rate increase rate	200%	0	-66.67%	-	-	-	0	44.44%	113.31%	-
	Elapsed time/day	88	77	98	-	-	-	-	88	88	-
	Blind element degradation/day ⁻¹	2.27%	0	-0.68%	-	-	-	-	0.53%	1.26%	-
T4	Over hot pixel number	1	3	2	4	11	1	6	2	0.816	22
	Dead pixel number	0	0	0	12	0	0	0	0	0	12
	Blind element rate	0.35%	1.04%	0.69%	5.56%	3.82%	0.35%	0.69%	0.69%	0.28%	1.97%
	Blind rate increase rate	-66.67%	50%	100%	1 500%	0	-93.33%	0	27.78%	69.83%	6.25%
	Elapsed time/day	206	195	216	473	290	248	-	206	206	-
	Blind element degradation/day ⁻¹	-0.324%	0.256%	0.463%	3.17%	0	-0.376%	-	0.13%	0.33%	-
T2-3	Test process failure pixel	2	0	-2	-	-	-	0	0	1.63	-
	Pixel failure rate λ/h ⁻¹	4.87E-8	4.65E-9	-	-	-	-	1.55E-9	2.67E-8	2.2E-8	-
	Pixel storage life/year	16.26	-	-	-	-	-	-	16.26	0	-
	Blind rate increase rate	200%	0	-66.67%	-	-	-	0	44.44%	113.31%	-
T3-4	Process failure pixel	-2	1	1	-	-	-	0	0	1.41	-
	Pixel failure rate λ/h ⁻¹	-	4.63E-9	4.63E-9	-	-	-	3.06E-10	4.63E-9	0	-
	Pixel storage life/year	-	85.65	85.56	-	-	-	-	85.56	0	-
	Blind rate increase rate	-66.67%	50%	100%	-	-	-	0	27.78%	69.83%	-
T1-4	Process failure pixel	-2	1	2	15	0	-14	1	0.33	1.7	2
	Pixel failure rate λ/h ⁻¹	-	4.63E-9	9.61E-9	9.00E-8	9.18E-10	-	1.47E-9	7.12E-9	2.49E-9	1.6E-9
	Pixel storage life/year	-	85.56	82.45	66.04	47.5	-	85.56	84.01	1.56	82.45
	Blind rate increase rate	-66.67%	50%	0.69%	1 500%	0	-93.33%	20%	-5.32%	47.82%	6.25%
	Elapsed time/day	206	195	216	473	290	248	-	206	206	-
	Blind element degradation/day ⁻¹	-0.324%	0.256%	3.19%E-3	3.17%	0	-0.376%	-	-0.02%	0.24%	-

4.2 恒定应力加速退化试验 ADT^[18]

用样件 LS1、LS2、LS3 的温度、时间敏感参数,盲元退化量递增趋势的分布数据,进行储存寿命评估,计算得到 LS1、LS2、LS3 在测量时间集 {T1, T2, T3, T4} 的盲元退化量均值 {0, -1.16, 0.53, 0.13} 和标准差 {0, 1.16, 1.26, 0.33}, 测量时刻的均值 {0, 19.88, 206}, 如表 1 所示。由最小二乘法拟合试验数据得盲元退化量随时间变化的线性方程为:

$$\begin{aligned} \mu(t) &= 3.474 \times 10^{-3}t - 0.397 \\ \sigma(t) &= -1.686 \times 10^{-3}t + 0.944 \end{aligned} \quad (10)$$

利用碲镉汞焦平面阵列像元可靠性与盲元退化量分布的关系(即性能可靠性)评定其可靠性,可靠度为:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{D_f - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (11)$$

盲元退化量定义为:

$$Z(t) = \frac{[B(t) - B_{ir}]/B_{ir}}{t} \quad (12)$$

式中: $Z(t)$ 为单位时间的盲元率百分比; $B(t)$ 为检测时刻的盲元率; t 为初始盲元率与检测时刻盲元率之间经历的时间间隔。对于 288 个通道存在 1 个无效通道的初始盲元率为 0.35%, 当允许盲元率百分比 100% 时, 存在 2 个无效通道的盲元率为 0.69%, 10 年使用寿命的盲元退化量失效阈值 D_f 为 0.0274%/day。如果失效阈值 D_f 取 0.03、0.3、3%/day (无效通道数 2、12、111), 得到高温 +85 °C 加速应力下的中位寿命(即当可靠度 $R=0.5$ 时所对应的寿命) 125、200、975 天, 按加速系数 143 折算到 +25 °C 常规应力的中位寿命为 49、78、382 年。由公式(11)绘制的可靠度曲线图 4 可知, 可靠度与失效阈值有关, 失效阈值不同得到的

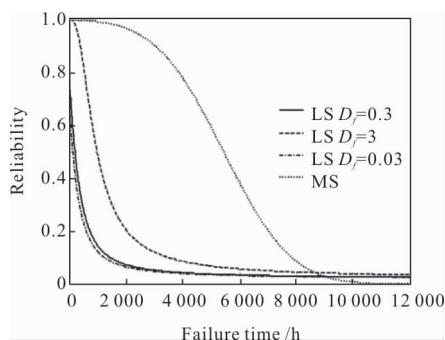


图 4 性能退化分布的可靠度曲线

Fig.4 Reliability curve of performance degradation distribution

可靠度曲线不一样,且存在较大的差别。

图 5 给出样件 MS1、MS2、MS3 盲元率的退化轨迹,用最小二乘法拟合试验数据得盲元率随时间变化的二阶拟合方程。

$$\begin{aligned} B_{MS1} &= 8.39 \times 10^{-8}t^2 - 9.87 \times 10^{-5}t + 0.16 \\ B_{MS2} &= 4.94 \times 10^{-8}t^2 - 2.63 \times 10^{-5}t + 0.15 \\ B_{MS3} &= 2.58 \times 10^{-8}t^2 - 1.03 \times 10^{-5}t + 0.15 \end{aligned} \quad (13)$$

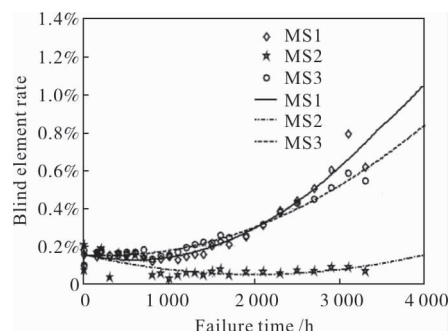


图 5 试验数据的退化轨迹曲线与拟合轨迹

Fig.5 Degradation paths and fitting paths of experimental data blind element rate

根据公式(13)盲元率退化轨迹模型,外推求得样件 MS1、MS2、MS3 达到失效阈值盲元率 1% 的伪寿命 {3 820, 4 420, 8 070}/h。假设伪寿命值服从正态分布,它的 $E[t]=5 437$ h、 $\text{Var}[t]=1 878$ h, 在给定时间 t 的可靠度 $R(t)$ 的点估计为:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - 5 437}{1 878}\right) \quad (14)$$

图 4 给出公式(14)计算的可靠度曲线。由公式(14)求得高温 +80 °C 加速应力下可靠度 0.98 的寿命 1 490 h, 按加速系数 101 折算到 +25 °C 常规应力的寿命为 17 年,其中位寿命为 63 年。

5 试验应力水平

恒定高温应力能激发碲镉汞焦平面材料退化、钝化层绝缘损坏和导电金属接触不良等故障模式,长时间的恒定高温应力会引起材料发生累积损伤而改变物理特征,材料物理特征的改变又有可能导致电学特性或者其他特性发生变化。由高温 +71 °C 储存 1 507 h、+80 °C 储存 3 300 h、+85 °C 储存 2 778 h 定时截尾试验,所获得的寿命、性能信息外推到常规应力条件下的寿命评定可知,高可靠性长寿命碲镉

汞焦平面阵列像元光电转换功能的退化与失效缓慢,很难在较短时间内收集到大量的失效数据,需要用定量加速试验缩短试验时间,使用应力累积损伤方法,连续测试性能退化特性趋势,直至退化特性显著变化或发生失效为止。

定量加速试验,有加速寿命试验和加速退化试验。加速寿命试验主要用截尾法来结束试验,试验中只有少量或没有失效出现,获取的截尾数据对可靠性或寿命评定就有较大的偏差。有标准推荐施加高温+70℃、1 500 h 热应力评定碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦组件芯片的储存寿命,显然很难得出可信的寿命或可靠性评定,需要更高应力下得到的性能退化数据外推评定储存寿命,恰当的应力强度应大于高温+90℃、2 160 h。

加速退化试验通过估计给定应力下的退化轨迹与分布外推确定失效时间,用性能退化数据分析代替传统的失效数据分析进行可靠性评定。现有条件不能在高温环境下进行碲镉汞焦平面阵列的性能评价测量,可操作的恒定高温加速退化试验,只能采用温度循环应力的方式进行累积损伤的加速试验。试验样件从自然环境温度升温至高温试验温度,储存规定试验时间,降温至自然环境温度,制冷到工作温度 80 K 测量信号电压进行性能评价,升温至自然环境温度,完成一次性能退化加速试验,根据需要重复循环多次,只要性能退化趋势十分明显,即可终止试验。

320×256 MW 样件 MS1~MS3 就是典型加速退化试验的实例。然而,用加速寿命试验计算公式(8)、(9)评定的储存寿命是 40 年,而用加速退化试验计算公式(13)、(14)评定的储存寿命是 17 年。用像元退化量分布与可靠性统计评定储存寿命的结果差异较大,可能受样件总体和像元样本数量的限制,与碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦组件制造水平、性能评价测量误差、试验应力强度和失效阈值等因素高度相关。这并不妨碍加速退化试验,应用到碲镉汞焦平面阵列像元储存寿命的统计评定。

6 结 论

碲镉汞红外焦平面阵列样件有高可靠性长寿命特征。用定时截尾加速寿命试验获得的失效率,评定

288×4 LW 寿命大于 80 年,评定 320×256 MW 寿命大于 40 年;用加速退化试验性能退化分布参数,评定 288×4 LW 的中位寿命大于 50 年,评定 320×256 MW 的中位寿命大于 63 年。施加高温+70℃、1 500 h 的试验应力,所得到的失效或退化数据,不足以对寿命进行可信的评定,应大于高温+90℃、2 160 h。

LS 样件高温+71℃和+85℃步进应力、MS 样件高温+80℃恒定应力加速试验,其性能退化呈现时间、温度敏感递增或减趋势的参数有噪声电压、NETD、响应率和响应率均匀性,表现为初始盲元率的变化,失效像元的数量、位置和分布特征也随之改变,试验前失效的像元试验后不失效,显示像元光电转换功能稳定性差、存在残余工艺应力或性能评价检测系统的测量不确定度较大。

参 考 文 献:

- [1] Per W Schmidt. NRL hybrid reliability physics of failure initial study[R]. ADA217986, 1990.
 - [2] John W Marciniak. Hybrid PV HgCdTe IR detectors technology reliability and failure physics program - environmental stress testing plan[R]. ADA191165, 1987.
 - [3] Rolin K. Asatourian. Infrared focal plane array storage life assessment by accelerated aging [J]. *Quality and Reliability Engng Int*, 1998, 14: 425-432.
 - [4] Xavier Breniere, Philippe Tribolet. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance [C]//SPIE, 2008, 6940: 69400H-1-13.
 - [5] Pieruschka E. Relation between lifetime distribution and the stress level [R]. LMSD -400800, Sunnyvale, California: Lockheed Missile and Space Division, 1961.
 - [6] Nelson W. Accelerated Testing: Statistical Methods, Test Plans, and Data Analysis [M]. New York: John Wiley Press, 1990.
 - [7] Hou Zhijin, Fu Li, Wang Wei, et al. Study on connected defective elements in focal plane array identification by response and crosstalk [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0420002. (in Chinese)
- 候治锦,傅莉,王巍,等.用响应和串音识别焦平面探测器相连缺陷元研究[J].红外与激光工程,2017,46(4): 0420002.

- [8] Hao Lichao, Huang Aibo, Lai Canxiong, et al. Discussion of reliability analysis on IRFPAs by bad pixel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504004. (in Chinese)
郝立超, 黄爱波, 赖灿雄, 等. 盲元作为红外焦平面可靠性分析手段的探讨 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0504004.
- [9] Wang Wei, Fan Yangyu, Si Junjie, et al. Types and determination of bad pixels in IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2261–2264. (in Chinese)
王巍, 樊养余, 司俊杰, 等. 红外焦平面阵列盲元类型与判别[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2261–2264.
- [10] Hou Zhijin, Fu Li, Lu Zhengxiong, et al. Causes and characteristics of indium bump defects in InSb focal plane array [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 325–331. (in Chinese)
候治锦, 傅莉, 鲁正雄, 等. InSb 面阵探测器钢柱缺陷成因与特征研究[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(3): 325–331.
- [11] Antoni Rogalski. Infrared Detectors [M]. 2nd ed. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, translated. Beijing: China Machine Press, 2014: 641, 406, 369. (in Chinese)
罗格尔斯基. 红外探测器 [M]. 第 2 版. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014: 641, 406, 369.
- [12] Chen Xing. Research on the related technology of HgCdTe infrared focal plane detector reliability [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 12. (in Chinese)
陈星. 碲镉汞红外焦平面探测器可靠性相关技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014: 12.
- [13] Zhang Wenwei, Li Hongmin. Induction treatment of environmental profile of natural storage station [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8 (1): 61–81. (in Chinese)
张文伟, 李宏民. 自然贮存场自然环境剖面归纳处理[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 61–81.
- [14] Nitz H M, Ganschow O, Kaiser U, et al. Quasi-simultaneous SIMS, AES, XPS, and TDMS study of preferential sputtering, diffusion, and mercury evaporation in Cd_{1-x}Hg_xTe [J]. *Surface Science*, 1981, 104(2/3): 365–383.
- [15] Mestechkin A, Lee D L, Cunningham B T, et al. Bake stability of long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, 24: 1183–1187.
- [16] Jiang Renyuan, Zhang Xingtang, Yang Yichun. Study on accelerated life test of function degenerating type by temperature stress[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2000, 24(6): 523–527. (in Chinese)
姜仁元, 张兴唐, 杨亦春. 温度应力下功能退化型加速寿命试验问题研究 [J]. 南京理工大学学报, 2000, 24(6): 523–527.
- [17] Yurkowsky W, Schafer R E, Finkelstein J M. Accelerated testing technology. Technical Report No. RADC-TR-67-420 [R]. Rome Air Development Center, 1967.
- [18] Deng Aimin, Chen Xun, Zhang Chunhua, et al. Reliability assessment based on performance degradation data [J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27 (3): 546–552. (in Chinese)
邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 546–552.