

硅雪崩光电探测器工作寿命试验及失效分析研究

邓敏¹, 孙莉¹, 周小燕², 何伟², 梁晨宇², 李龙²

(1. 驻209所军事代表室, 成都 610041; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要:通过 FMEA 分析和加速寿命试验, 确定了硅雪崩光电探测器的主要失效模式有两种, 一种是暗电流超标, 另一种是前置输出电压不合格; 对这两种失效模式进行了失效分析, 认为是高温应力引起器件内部气氛的变化, 主要是氢气含量变大引起器件暗电流不合格; 大电流引起前置放大电路上晶体管损伤是前置输出电压不合格的原因。

关键词:硅雪崩光电探测器; FMEA; 加速寿命试验; 失效分析

本文引用格式:邓敏, 孙莉, 周小燕, 等. 硅雪崩光电探测器工作寿命试验及失效分析研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(8):160-163.

Citation format:DENG Min, SUN Li, ZHOU Xiao-yan, et al. Research on Lifetime Testing and Failure Analysis of Silicon Avalanche Photoelectric Detectors[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(8):160-163.

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2016)08-0160-04

Research on Lifetime Testing and Failure Analysis of Silicon Avalanche Photoelectric Detectors

DENG Min¹, SUN Li¹, ZHOU Xiao-yan², HE Wei², LIANG Chen-yu², LI Long²

(1. Military Representative Office in No. 209 Institute, Chengdu 610041, China;

2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Through FMEA analysis and accelerating lifetime testing, two primary failure modes of silicon avalanche photoelectric detectors were determined: excess of dark current and disqualification of pre-amplifier voltage. Failure analysis shows that: the change of internal atmosphere, due to high temperature stress, causes the dark current unnormal, especially large amount of hydrogen; damage of transistors in pre-amplifier caused by large current is main reason of disqualification of pre-amplifier voltage.

Key words: silicon avalanche photoelectric detector; FMEA; accelerating lifetime testing (ALT); failure analysis

随着光电技术的发展, 硅雪崩光电探测器广泛应用于激光探测、激光告警和激光测距等领域, 其作用是将接收到的光信号转化成电信号, 并放大成系统所需要的信号后输出, 是系统中的关键, 一旦失效将造成巨大损失。对于连续工作的硅雪崩光电探测器, 系统对其工作寿命提出了较高的要求, 但是迄今有关硅雪崩光电探测器寿命研究的报道甚少, 本文对硅雪崩光电探测器进行了 FMEA 分析, 设计并实施了加速寿命试验。试验得到了与理论分析相同的两种失效模

式, 对其进行了失效分析, 对光电探测器的寿命研究可以提供一定参考。

1 产品结构和功能

硅雪崩光电探测器结构组成如图 1 所示。它由雪崩管管芯、前置放大器电路、带窗口玻璃的壳体三大部份构成, 雪崩管管芯的作用是将接收到的激光信号转化成电流信号; 前

置放大电路由厚膜电路基片、厚膜电阻、片式电容、片式电阻、晶体管芯等元件通过导电银浆和内引线混合集成,其功能是将电流信号转换成电压信号后输出。壳体是 TO 封装的密封结构,由管座、带窗口玻璃管帽组成。管座的作用是定位安装光敏芯片和前放电路块的基底,器件通过管脚与外界实现电气连接,带窗口玻璃管帽作用是保障光信号的入射和与外界的气密封装。

2 FMEA 分析

关于光电器件,文献[1]指出光电探测器的退化以暗电流增加为主要特征,文献[2]对弹载激光探测器交付安装后的主要失效模式和影响进行了分析,集成电路等相关产品已经有相关故障模式和失效分析^[3-5],但关于硅雪崩光电探测

器的故障模式相关报道较少,在此基础上,根据产品结构和功能特点,结合用户使用信息,对硅雪崩光电探测器进行 FMEA 分析,见表 1。

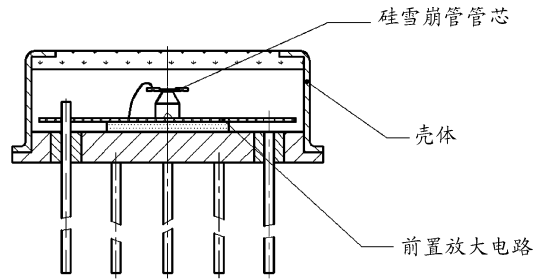


图 1 硅雪崩光电探测器结构

表 1 硅雪崩光电探测器失效模式与失效机理分析

序号	失效模式	失效机理	敏感应力
1	参数超标	材料、工艺原因引起硅 APD 芯片性能退化	温度应力、电应力
		工艺或内部气氛引起硅 APD 芯片表面漏电流增大	温度应力
2	性能退化	材料、工艺原因引起硅 APD 芯片性能退化	温度应力、电应力
		元件老化	温度应力、电应力
		粘接剂老化	温度应力
		金属-半导体接触退化	温度应力
		内部气氛引起硅 APD 芯片表面状态不稳定	温度应力
		引线接触不良或断开	温度应力
3	无信号输出	粘接不良或粘接失效	温度应力
		电路上元件失效	温度应力、电应力
		硅 APD 芯片被击穿	电应力
		噪声大,信号被淹没	温度应力、电应力
		硅 APD 芯片被烧坏	电应力、光应力
4	密封性不合格	不同材料热膨胀系数不同	温度应力
		窗口玻璃出现裂缝、裂纹	温度应力,机械应力
		材料缺陷	温度应力

通常情况下很难通过试验方法专门得到各种故障模式的试验数据,那么用户的使用数据就显得尤为珍贵。根据几千只某型硅雪崩光电探测器的使用情况看,用户更换探测器都是因为探测器性能逐渐退化至参数超标,通过分析认为参数超标是主要的失效模式。

温度和电压应力能激发硅雪崩光电探测器参数超标。用户使用过程中,系统对探测器施加过高电压的可能性很小;因此,在进行硅雪崩光电探测器的加速寿命试验设计时,只考虑温度对探测器失效的加速性。硅雪崩光电探测器是正温度系数的器件,工作环境温度升高时,需根据温度系数

对探测器施加相应的工作电压,保证探测器正常工作。

3 加速工作寿命试验和测试

硅雪崩光电探测器详细规范规定,工作温度 $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$,每年至少抽取同批次 5 只探测器进行 70°C ,1 000 h 稳态寿命试验。稳态寿命试验是抽样试验,每批次抽取 5 只样品进行试验。近 20 年来稳态寿命试验未出现过样品失效。随着工艺水平的提高,硅雪崩光电探测器的环境应力筛选失效率非常低,约为 1%,产品的品质一致性检验合格率

100%, 用户使用过程中没有反馈过任何与寿命相关的失效, 由此可见硅雪崩光电探测器具有较长的工作寿命。

加速寿命试验^[6]是评估硅雪崩光电探测器工作寿命的有效途径。通过设计、工艺分析、FMEA 分析和摸底试验, 确定了影响其工作寿命的主要应力是温度应力, 加速温度应力的极限是 130℃。由此设计了加速寿命试验方案:

应力类型为温度应力; 共 4 个应力水平, 分别是 80℃, 100℃, 120℃, 130℃; 根据产品的特点和工程需要, 试验采用步进应力施加的方式; 试验时间为 1 000 h, 或者每个应力下出现 3 只失效后转入下一阶段; 试验过程中在线检测每 8 h 进行一次, 根据 GJB548B 方法 1005.1 稳态寿命试验的要求, 每隔 168^{+72}_0 h 进行一次常温参数测试; 常温测试的参数有击穿电压、最佳工作电压、暗电流、前放静态输出电压、响应度和噪声等效功率等参数; 高温测试参数因试验系统的局限性选择暗电流和前放静态输出电压; 高温暗电流和静态输出电压不作为合格与否的判据, 主要是为了检测其变化规律, 为探测器的寿命状态提供参考。常温参数的判据参照产品的详细规范执行。

经过了半年左右的试验和测试, 常温参数测试得到了两种失效模式: 暗电流超标和前放输出电压超标。硅雪崩光电探测器 100℃ 及以下试验 1 000 h, 无论是高温性能参数还是常温性能参数均无明显变化, 120℃ 时开始出现变化趋势, 130℃ 试验时暗电流和前放静态输出电压均出现明显的变化趋势, 其变化曲线如图 2~图 4 所示。

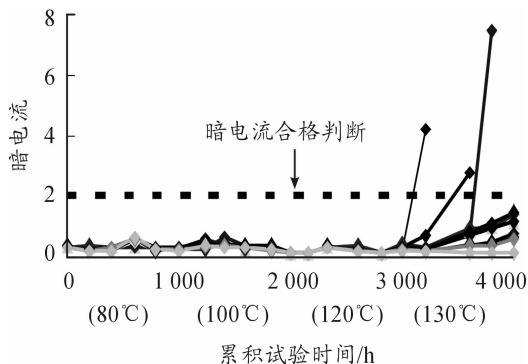


图 2 暗电流常温测试结果

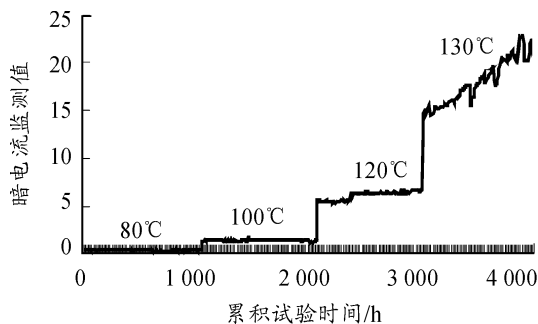


图 3 高温暗电流平均值

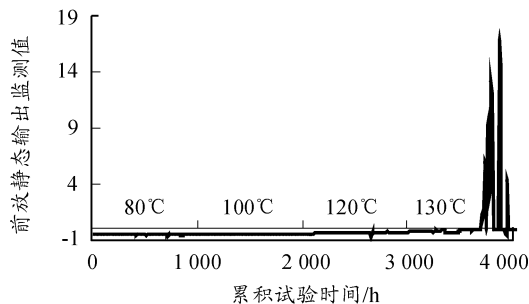


图 4 高温前放静态输出平均值

4 失效分析和讨论

4.1 暗电流不合格

由于样品失效表现为暗电流超标。在显微镜进行外观检查无异常现象; 从密封性测试数据看器件的密封性合格; 然后进行内部气氛检查, 检查结果见表 2, 并在内部气氛检查前后进行常温电参数测试, 测试结果见表 3, 同批次未进行寿命试验的器件的内部气氛分析结果见表 4。

表 2 试验样品内部气氛含量

试验样品编号	氮气/%	氢气/%	氦气/ppm	二氧化碳碳/ppm	水汽/ppm	氩气/ppm
1#	91.5	8.35	961	475	224	—
2#	92.7	7.15	1 011	312	487	—

表 3 内部气氛检测前后暗电流

试验样品编号	内部气氛检测前暗电流值/ μA	内部气氛检测后暗电流值/ μA
1#	0.75	0.01
2#	0.16	0.01

表 4 同批次器件内部气氛含量

编号	氮气/%	水汽/%	二氧化碳碳/ppm	氢气/ppm	氩气/ppm
3#	99.2	0.64	622	306	234
4#	99.1	0.8	595	260	—

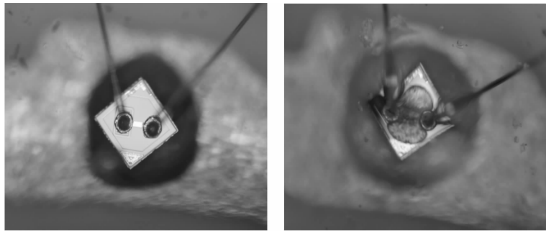
从表 2~表 4 中可以看出, 寿命试验前后, 器件内部气氛的变化主要是氮气、水汽含量明显降低, 氢气含量显著增加; 寿命试验后器件的暗电流增大。经过内部气氛分析后, 器件内部气氛与大气相当时, 器件暗电流合格。说明器件内部气氛的变化是造成寿命试验后暗电流不合格的原因。

对内部气氛的变化影响暗电流的机理进行初探, 由于分析手段有限, 查阅了相关文献。文献[7]对氢气环境下金硅

面垒探测器的失效机制进行了分析,得出氢气能够渗入硅晶体的晶格,受晶格的原子间相互作用的影响解离成原子态的氢,氢原子极易失去一个电子,将探测器芯片从氢气环境拿出后,通过扩散,氢气从晶格中慢慢逸出,最后探测器恢复到正常状态。文献[8]研究了氢对金属封装密封元器件可靠性的影响,指出氢原子进入金属栅与半导体接触的界面,改变肖特基势垒,改变漏电流。与本文描述的现象相同,证实了本文分析的结论。

4.2 前放输出电压不合格

在8~32倍的显微镜下对前放输出电压不合格的器件进行镜检,由于玻璃光窗的缘故,器件内部的前置放大电路图像模糊。将器件开帽后镜检,发现前置放大电路上的晶体管有损伤(图5)。开帽前后前放输出电压测试结果见表5。从表5中可以看出开帽前后前放输出电压值变化不大,与镜检中晶体管受到损伤导致其输出不合格的分析一致。



(a) 晶体管损伤前形貌显微镜图 (b) 晶体管损伤形貌图

图5 前置放大电路上的晶体管损伤对比

表5 开帽前后前放输出电压

编号	试验前前放 输出电压/V	试验后前放 输出电压/V
失效样品5#	-5.7	-5.15
失效样品6#	-7.8	-8.44
失效样品7#	-7.96	-6.34

从图5中可以看出,雪崩光电探测器前置放大电路上的晶体管芯表面形貌发生了变化,有明显的损伤,是大电流导致了晶体管管芯损伤。

5 结论

本文通过FMEA分析和摸底试验得到硅雪崩光电探测器的主要失效模式和敏感应力,设计并实施了加速工作寿命试验,得到了与试验相同的结果:主要的失效模式是暗电流超标和前放静态输出电压不合格,并对其进行了失效机理分析,内部气氛中氢气含量的变化是影响APD(雪崩管芯)暗电流超标的主要原因,较大的电流是前放输出电压不合格的主要原因。

参考文献:

- [1] 解金山. 光纤通信系统中光电探测器可靠性理论[J]. 半导体光电, 1990, 11(2): 171-181.
- [2] 李玉宝, 刘兵. 弹载激光探测器失效模式分析及预防措施研究[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(3): 185-188.
- [3] 肖诗满. 光电耦合器封装及相关失效机理[J]. 半导体技术, 2011, 36(4): 328-331.
- [4] 张蓬鹤. 集成电路封装级失效及其定位[J]. 半导体技术, 2015, 40(6): 455-459.
- [5] 郝跃, 刘红侠. 微纳米MOS器件可靠性与失效机理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828-831.
- [7] 涂俊, 黄宪果, 穆龙. 金硅面垒型半导体探测器在氢气环境下失效现象的实验研究[J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(1): 18-20.
- [8] 汪悦, 张素娟. 氢对金属封装密封元器件可靠性的影响[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(6): 5-9.
- [9] 邵俊峰, 刘阳, 王挺峰, 等. 皮秒激光对电荷耦合器件多脉冲损伤效应研究[J]. 兵工学报, 2014(9): 1408-1413.

(责任编辑 唐定国)