

文章编号: 1006-4710(2013)02-0192-05

# 四象限光电探测器高温输出自激失效分析

何凌空<sup>1,2</sup>, 高勇<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西光集团军代室, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 针对某型激光导引头所用的四象限光电探测器高温环境试验过程中出现的输出自激失效现象, 确定了失效物理模型和失效模式, 搭建了失效现象复现测试电路, 通过半破坏性开封、光学镜检和波谱分析, 提出探测器光敏面沟阻隔离区在工艺过程受离子污染, 使沟阻隔离区反型是导致四象限光电探测器输出自激的根本原因。根据光电探测器光敏面隔离区表面反型产生输出自激的失效机理, 针对电极膜真空蒸镀工艺引入有害离子的具体原因, 对电极膜制作工艺路线进行了改进。经生产实践证明, 改进后的工艺方法可有效消除该类失效模式的产生。

**关键词:** 四象限探测器; 输出自激; 反型; 失效分析;

**中图分类号:** TH765.2, TG502      **文献标志码:** A

## Failure Analysis of Output Self-Excitation of Four-Quadrant Photoelectric Detector at High Temperature

HE Lingkong<sup>1,2</sup>, GAO Yong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Army Representation Office, Xiguang Group, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** With an aim at the failure phenomenon of the output self-excitation appearing in the high-temperature test of four-quadrant photoelectric detector used in a certain type of laser missile guidance, the failure physical model and failure mechanism are determined. The failure phenomenon simulation testing electric circuit is set up. Also, this paper suggests that the quarantine area of photosensitive surfaces of the detector is subject to ion contamination in the manufacturing process via the semi-destructive disclosure, microscopic examination and spectroscopic analysis, thus, resulting in quarantine area inversion, which is the basic cause to lead to the output self-excitation of four-quadrant photoelectric detector. Based on the output self-excitation failure mechanism produced by the photosensitive surfaces quarantine area surface inversion of photoelectric detector and with an aim at the concrete causes to introduce the harmful ions by the vacuum coating process, the electrode coating manufacturing technological line has been improved. The practical production tests indicate that the improved manufacturing method of technology has effectively eliminated the generation of failure modes of the types.

**Key words:** four-quadrant photoelectric detector; output self-excitation; inversion; failure analysis

四象限光电探测器是利用微电子制作工艺, 将四个参数相同的光电二极管, 制作在同一半导体基材上, 光电二极管间通过沟阻隔离。激光导引头、激光经纬仪等光电跟踪、定位和准直仪器中常用四象限探测器作为光电传感器<sup>[1]</sup>。在某型激光导引头系统中, 四象限光电探测安装在光学系统物镜的离

焦面上, 激光光束经过物镜汇聚, 在四象限探测的光敏面上形成一个弥散斑, 四个光电二极管正比与所接收弥散斑光斑的面积输出电信号, 通过采集输出的电信号并经过计算可得出弥散斑光斑质心偏离四象限探测中心位置, 从而获得弹目轴线相对于系统光轴的角偏差<sup>[2-6]</sup>。光电探测器的暗噪声、亮噪声、

收稿日期: 2013-02-25

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(2013JK1111)。

作者简介: 何凌空, 男, 博士生, 研究方向为新型半导体器件与集成电路设计及检测。E-mail: helkong@126.com。

高勇, 男, 教授, 博导, 研究方向为新型半导体器件与集成电路设计等。E-mail: gaoy@xaut.edu.cn。

灵敏度阈值、转换效率、通道均匀性、通道隔离性等电性能指标和环境适应性,对激光导引头系统的导引精度等性能指标起着关键性作用<sup>[7-10]</sup>。在某批次激光导引头环境应力筛选的高温环境试验过程中,当升温到60℃保温4个小时后,给产品施加背景光辐射应力,在无激光入射时,发现四象限光电探测器有定频自激脉冲输出的失效现象产生,自激脉冲频率随施加的背景光强度和偏压大小变化而变化。

本文针对该四象限光电探测器失效的现象和器件自身的特性,确定了四象限光电探测器失效的物理模型和失效模式,通过实验和分析得出四象限光电探测器的失效机理,根据失效机理查找出生产工艺过程存在的问题,并通过批量生产对改进的工艺方法进行验证。

## 1 失效物理模型和失效模式

### 1.1 四象限光电探测器失效的物理模型

为了借用物理、化学的方法对四象限光电探测器失效进行系统地分析,需要根据其失效现象和时机,建立适当的失效物理模型<sup>[11]</sup>。光电器件失效分析常用的失效物理模型可分为:界限模型、耐久模型、应力-强度模型、阿列里乌斯(Arrhenius)模型、艾林(Eyring)模型、串联模型、并联模型、累计损伤模型<sup>[12]</sup>等。

当四象限光电探测器同时施加一定时间的温度应力、偏压大于一定值电应力、光强大于一定值光辐射应力,四象限光电探测器出现输出自激现象,撤去任一应力或全部应力,输出自激现象消除。界限模型是从引起失效的应力界限和能量界限去研究失效机理一种模型<sup>[12]</sup>,四象限光电探测器产生失效的条件是温度应力达到一定界限、偏压电应力达到一定界限、光辐射应力达到一定界限,自激现象产生,因此四象限光电探测器的失效物理模型可用界限模型进行描述。

### 1.2 四象限光电探测器失效模式

失效模式是指失效的电子元器件不能使用原因、失效的现象和形式,不需要验证和深入说明其物理原因<sup>[12]</sup>。光电二极管一般的失效模式主要有:结构损伤、光学件断裂、开路、短路、电性能参数(暗噪声、亮噪声、灵敏度阈值、转换效率、通道均匀性、通道隔离性、击穿电压等)退化和I-V特性变化等。根据四象限光电探测器失效现象和形式,以及故障激光导引头分解后四象限光电探测器的完好的机械外观特征,分析可推断其失效模式为性能参数退化造成器件失效。

## 2 失效机理

失效机理指电子元器件失效的物理(或化学)本质,从开始失效的原始缺陷或退化进入失效点的物理过程,进一步确定导致失效的质量缺陷、表面缺陷及体缺陷、结构缺陷,确定电学、金属学、化学及电磁学等方面的机理<sup>[12]</sup>。导致光电二极管电性能参数退化的可能原因有以下几类:

- 1) 器件外引线间绝缘特性变差;
- 2) 器件欧姆接触,如压焊点、合金焊料焊接点、还氧导电胶胶合点存在缺陷;
- 3) 器件钝化膜、外延有源层、PN结等因为外界污染造成缺陷;
- 4) 器件晶体内部的各种错位、缺陷或诱生缺陷密集处局部优先击穿等缺陷;
- 5) 外界因素如温度、机械形变、静电、高能粒子辐射等导致器件物理损伤<sup>[13-17]</sup>。

为准确定位四象限光电探测器电性能参数退化的失效机理,按照失效机理分析的一般步骤,从失效现象复现入手,对四象限光电探测器进行由表及里的实验和分析。

### 2.1 失效现象复现

根据四象限光电探测器使用的环境、工作电路特点,我们搭建了失效现象复现测试电路,其原理图如图1所示。

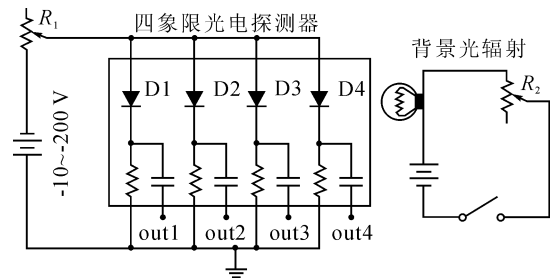


图1 四象限光电探测器测试电路原理图  
Fig.1 Experimental schematic of four-quadrant photoelectric detector

图1中D1、D2、D3、D4为四象限光电探测器的四个光电二极管,通过改变电位器 $R_1$ 的值,可实现对四象限探测器偏置电压调整,OUT1~OUT4为四象限光电探测器的四个输出接口,分别连接到示波器的四个输入端子,改变电位计 $R_2$ 的值可调整探测器背景光的光强,整个测试电路置于高温箱内,模拟实际器件失效时的温度应力。首先对失效探测器的静态参数进行测试,测试结果表明该器件的暗电流、耐压值、灵敏度等均符合要求。再对测试电路加电进行动态检测:在电路上电状态下,当给测试电路加

热到 50 ℃ 并保温 2 小时后,调整  $R_1$  增加四象限光电探测器的偏压,调整  $R_2$  增加四象限光电探测器光敏面的光强,四象限光电探测器输出端出现定频脉冲,脉冲的频率和幅值随施加到四象限光电探测器的偏压及光强大小变化而变化,失效现象得到复现,其典型输出自激失效现象如图 2 所示。

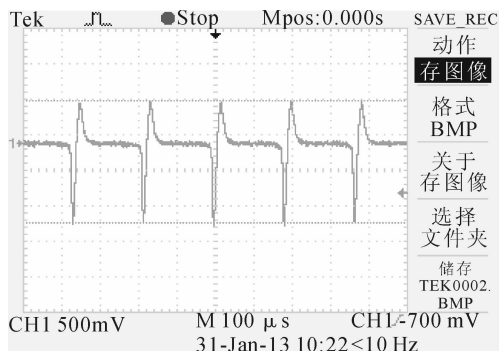


图 2 四象限光电探测器输出自激

Fig. 2 Output self-excitation of four-quadrant photoelectric detector

测试结果表明,四象限光电探测器在外界应力的作用下,激发了其内部潜在故障,故障原因为器件内在失效所致。

## 2.2 开封检测、光学镜检及波谱检测

根据微电子器件失效分析的一般流程,我们对四象限光电探测器进行半破坏性开封检测,并对芯片表面、引线进行光学镜检,未发现明显击穿现象,对四象限光电探测器光敏面进行 X 射线波谱仪检测,发现有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{H}^+$  等非正常工艺过程引入离子存在,可初步判定四象限光电探测器光敏芯片受到非正常工艺过程引入的离子污染,导致芯片表面性能退化,在外界应力作用下芯片内部发生击穿放电,从而引发器件失效。

## 2.3 受离子污染光敏芯片自激输出原理分析

四象限光电探测器光敏芯片工作原理如图 3 所示。在正常工作情况下, $\text{N}^+$  和  $\text{P}^+$  间施加 200 V 电压, $\text{N}^+$  为光敏面, $\text{P}^+$  公共区和  $\text{P}^+$  沟道阻隔区通过  $\text{P}^-$  连接,在没有光照条件下,半导体内存在热效暗电流,当一定强度光子入射到光敏象限区,半导体价带中的电子吸收光子能量而激发到导带,形成光生载流子,从而使半导体材料的电导率增加电流增大,光照停止后,光生载流子会因复合而消失,半导体中的载流子恢复到热平衡状态时的值,内部电流减小,这一电流变化过程会在探测器输出端通过隔直电容产生光电脉冲。

当四象限光电探测器光敏芯片受到离子污染时,其工作原理图如图 4 所示,外界的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{H}^+$  等离

子在生产工艺过程中进入沟道阻隔区的  $\text{SiO}_2$  层钝化层,可造成芯片表面性能退化,当正电荷累积到一定密度,会造成 P 型沟道阻隔区表面形成反型区,当给探测器光敏芯片加偏压,空间电荷分布会因反型层而展宽,使得沟道阻隔  $\text{P}^+$  区和  $\text{P}^-$  区断开。

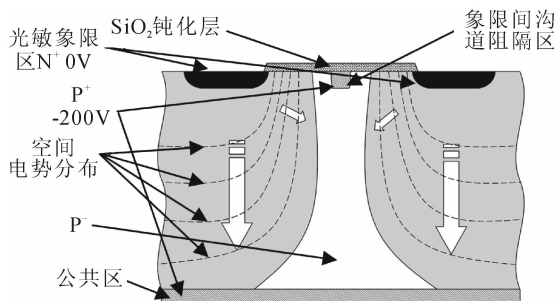


图 3 四象限光电探测器光敏芯片工作原理

Fig. 3 Dynamic working schematic of four-quadrant photoelectric detector

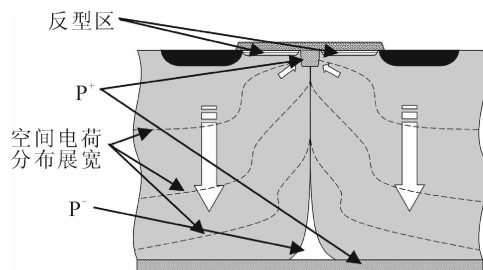


图 4 光敏芯片受到离子污染时四象限光电探测器  
Fig. 4 Dynamic working schematic of four-quadrant photoelectric detector polluted by ion

当一定强度光应力施加到探测器光敏面上时,使半导体材料的电导率增加电阻减少,在图 1 中  $R_1$  阻值一定条件下,探测器光敏芯片的压降变小,空间电荷区变薄,同时光生载流子为  $\text{P}^+$  沟道阻隔区充电使其电势增加,此时沟道阻隔  $\text{P}^+$  区和  $\text{P}^-$  区重新连接, $\text{P}^+$  沟道阻隔区积累的电荷会给  $\text{P}^-$  区放电,放电结束后沟道阻隔  $\text{P}^+$  区和  $\text{P}^-$  区恢复断开,如果光应力还存在,会形成间歇放电现象(如图 5 所示),间歇放电会使临近的四象限光电探测器输出端产生感应脉冲。

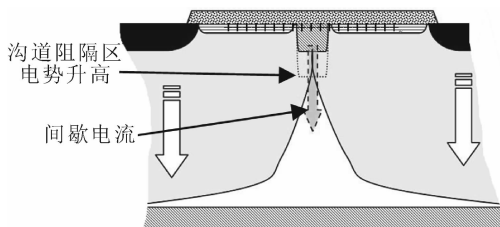


图 5 间歇电流产生原理图

Fig. 5 Intermittent current engendering schematic

四象限光电探测器工作温度升高,半导体材料的禁带宽度变窄,光电效率增加,光生载流子形成的光电流增加,会加剧这种脉冲放电现象,同样入射光强变化也会影响光生载流子浓度,进而影响光电流的大小,也会对脉冲放电现象产生影响。

### 3 引入离子污染工艺过程分析

四象限光电探测器光敏芯片制造工艺包括:晶片抛光工艺、晶片外延工艺、热氧化工艺、光刻刻蚀工艺、离子注入工艺、钝化工艺、电极膜工艺、引线工艺、封装工艺。这些工艺过程中均可给芯片引入有害离子,造成芯片离子污染可能是某道工艺或多道工艺设备洁净度控制失控,也可能是器件的工艺流转过程或存放环境存在污染造成,因此需对芯片制造的所有工艺过程中可引入污染的所有因素包括:生产厂房洁净度、工艺设备内部残留离子、原材料纯度进行检查。经对生产车间进行停产整顿和全面检查,发现在工艺过程使用的真空镀膜机为通用设备,曾经为其它产品生产过光学增透膜和截至膜等,镀膜机内腔和蒸发坩埚残余的离子在电极膜生产过程引入到芯片光敏面。

真空镀膜是指在真空环境下,将某种金属或金属化合物以气相的形式沉积到材料表面(通常是非金属材料),属于物理气相沉积工艺<sup>[18]</sup>,真空镀膜机工作原理如图6所示。

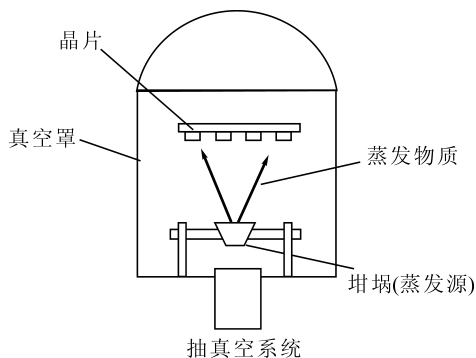


图6 真空镀膜机工作原理图

Fig.6 Principle diagram of vacuum coating machine

在制作四象限光电探测器光敏芯片电极膜时,探测器晶片放在真空镀膜上部的托盘内,电极膜所用的原材料 Cu、Au 等放置在坩埚内,使用电阻加热源对坩埚进行加热,同时抽真空系统工作,Cu、Au 等金属材料在高温和超真空条件下气化,以冷凝方式沉积在晶片的表面,形成四象限光电探测器光敏芯片电极。在这一过程中真空镀膜机内部要求严格洁净,如果镀膜机曾经对其它产品进行膜层蒸镀作业,则会在其内腔、坩埚、托盘等残留其它有害离子,

在真空蒸镀过程中,电极膜沉积生成时,会将这些有害的残留离子一起引入光电探测器光敏芯片表面,造成对芯片的污染,这些污染达到一定程度,残留离子会进入沟道阻隔区的 SiO<sub>2</sub> 层钝化层,可造成芯片表面性能退化,导致芯片产生图2所示的输出自激失效现象。

根据上述分析,针对引入污染的原因,对产品现行的生产工艺路线进行调整,使用专用真空镀膜机制作电极膜进行了验证批生产,该批产品性能检测和应力筛选结果表明,改进后的工艺路线可有效消除四象限光电探测器高温背景光照射输出自激的现象。

### 4 结论

按照改进后工艺路线生产的器件,可有效消除高温输出自激失效现象的结果表明,失效分析过程中按照失效现象建立的失效物理模型和确定的失效模式正确,根据实验和测试分析得出的失效机理正确,依照失效机理制定的改进措施准确有效。四象限光电探测器输出自激失效分析过程也表明,光电子器件的质量与生产工艺过程的任何一个环节紧密相关,严格生产过程工艺控制对控制产品质量的至关重要。

### 参考文献:

- [1] 冯龙龄,郑仁亮. 四象限光电跟踪技术中若干问题的探讨[J]. 红外与激光工程,1996, 25(1):16-21.  
Feng Longling, Zheng Renliang. Study on optical tracking with four-quadrant photo-detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 1996, 25(1): 16-21.
- [2] 匡萃方,冯其波,冯俊艳. 四象限探测器用作激光准直的特性分析[J]. 光学技术,2004, 30(4):387-389.  
Kuang Cuifang, Feng Qibo, Feng Junyan. Analyzing characteristic of the four-quadrant detector applied to laser alignment [J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 387-389.
- [3] 安毓英,曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社. 2004.
- [4] 王兵,王伟国,郭汝海. 基于四象限探测器的监视对准实验[J]. 光机电信息,2011, 28(12):37-40.  
Wang Bing, Wang Weiguo, Guo Ruhai. Alignment experimental analysis based on four quadrant detector [J]. OME Information, 2011, 28(12): 37-40.
- [5] 黄强辉,曹益平. 采用四象限探测器检测干涉条纹正交信号的新方法[J]. 中国激光,2009, 36(5):1166-1170.  
Huang Qianghui, Cao Yiping. New method for detecting orthogonal signals of laser interference fringes using four-quadrant detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36

- (5):1166-1170.
- [6] 杨桂栓,张志峰. 死区对四象限探测器探测范围和灵敏度影响的研究[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(6):062303.  
Yang Guishuan, Zhang Zhifeng. Study on influence of dead zone on detection range and sensitivity four-quadrant detector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6):062303.
- [7] 匡萃方,冯其波,刘斌. 背景光对四象限探测器干扰的研究[J]. 激光与红外,2004,34(6):493-495.  
Kuang Cuifang, Feng Qibo, Liu Bin. Study on background light influence on four-quadrant detector [J]. *Laser & Infrared*,2004,34(6):493-495.
- [8] 张雷,张国玉,刘云清. 影响四象限探测器探测精度的因素[J]. 中国激光,2012,39(6):0605007.  
Zhang Lei, Zhang Guoyu, Liu Yunqing. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2012,39(6):0605007.
- [9] 齐哲明,陈海清,李俊. 红外四象限探测器暗电流自动测量技术研究[J]. 光学与光电技术,2006,4(1):21-23.  
Qi Zheming, Chen Haiqing, Li Jun. Dark current automatic measurement of the quarter infrared optic-electronic detector [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(1):21-23.
- [10] 赵馨,佟首峰,姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程,2010,18(10):2164-2170.  
Zhao Xin, Tong Shoufeng, Jiang Huilin. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10):2164-2170.
- [11] 姚立真. 可靠性物理[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [12] 孙青,庄奕琪,王锡吉,等. 电子元器件可靠性工程[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [13] 徐国昌,凌一鸣. 光电子物理基础[M]. 南京:东南大学出版社,2000.
- [14] 陈力俊. 微电子材料与制程[M]. 上海:复旦大学出版社,2005.
- [15] 林涛,林楠,马新尖. 寄生参数对半导体激光器直接调制特性的影响[J]. 西安理工大学学报,2011,27(3):295-300.  
Lin Tao, Lin Nan, Ma Xinjian. Effects of parasitic parameters on the modulation characteristics of semiconductor laser diodes[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*,2011,27(3):295-300.
- [16] 施卫,田立强. 半绝缘 GaAs 光电导开关的击穿特性[J]. 半导体学报,2004,25(6):691-696.  
Shi Wei, Tian Liqiang. Breakdown characteristics of semi-insulating GaAs photoconductive switch [j]. *Chinese Journal of semiconductors*,2004,25(6):691-696.
- [17] 陈颖. 电子材料与元器件[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [18] 金原繁,杨希光译. 薄膜的基本技术[M]. 北京:科学出版社,1982.

(责任编辑 杨小丽)