

〈材料与器件〉

## 基于威布尔分布的某半导体器件贮存寿命分布规律初探

王乔方<sup>1,2</sup>, 郑万祥<sup>1</sup>, 王冲文<sup>2</sup>, 刘 剑<sup>2</sup>, 罗 瑞<sup>1,2</sup>, 赵远荣<sup>2</sup>

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 国营第二九八厂, 云南 昆明 650114)

**摘要:** 对有机电致发光二极管 (Organic Light-Emitting Diode, OLED) 微型显示器件进行 90℃、80℃、70℃ 的高温贮存试验, 获得产品的失效数据。基于威布尔分布模型, 采用最小二乘法进行参数估计, 对失效数据分析, 获得 OLED 微型显示器件失效分布函数。应用经典可靠性理论, 计算产品在 90℃、80℃、70℃ 的特征寿命、可靠寿命及平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failure, MTBF)。采用 Arrhenius 模型, 依据 90℃、80℃、70℃ 的贮存特征寿命, 获得常温下产品的贮存特征寿命。分析结果表明, 该方法合理、简便、有效, 数据结果可以进一步应用到推导产品常温贮存寿命。

**关键词:** 威布尔分布模型; 失效分布函数; 可靠性; 特征寿命; 可靠寿命; MTBF; Arrhenius 模型

**中图分类号:** TB114      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2020)11-1077-04

### Preliminary Study on Storage Life Distribution of Semiconductor Device Based on Weibull Distribution

WANG Qiaofang<sup>1,2</sup>, ZHENG Wanxiang<sup>1</sup>, WANG Chongwen<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>, LUO Rui<sup>1,2</sup>, ZHAO Yuanrong<sup>2</sup>

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 2. State-Owned No. 298 Factory, Kunming 650114, China)

**Abstract:** In this study, a semiconductor device was tested for high temperature storage at 90℃, 80℃ and 70℃, and the failure data is obtained. Based on the Weibull distribution model, parameter estimation was carried out by the least square method. The failure distribution function of the semiconductor device was obtained. And the classical reliability theory was applied to calculate the characteristic life, reliable life and MTBF of the product at 90℃, 80℃ and 70℃. Using the Arrhenius model, the storage characteristic life of the semiconductor device at room temperature was obtained, according to the storage characteristic life of 90℃, 80℃ and 70℃. The results show that the method is reasonable, simple and effective, and the results can be used to derive the normal temperature storage life.

**Key words:** Weibull distribution model, failure distribution function, reliability, characteristic life, reliable life, MTBF, Arrhenius model

## 0 引言

随着武器装备朝着多用途、全天候的方向发展, 对其功能、性能的要求越来越高, 尤其是在不同环境下的可靠性和寿命指标。

OLED 微型显示器应用于观瞄类武器装备, 要求其寿命为 10 年~20 年, 甚至更长。采用一般的试验方法对 OLED 微型显示器的可靠性<sup>[1-4]</sup>指标进行评价, 试验时间长、费用高。需要采用加速寿命试验<sup>[5-6]</sup>方法来评价微型显示器件可靠性指标。因此, 研究高温环

境下 OLED 微型显示器件的存储寿命分布非常重要。

基于经典可靠性理论, 在产品寿命指标评估中, 首先要确定符合产品寿命的失效概率分布规律, 然后根据产品失效概率分布确定产品可靠性、寿命指标。威布尔 (Weibull) 分布是非线性分布, 常用于研究产品失效时间不随线性变化的情况, 指数分布、瑞利分布和正态分布都是威布尔分布的特殊形式<sup>[7]</sup>。因此, 威布尔分布广泛应用于产品失效分布建模中。

本文采用威布尔分布模型针对 OLED 微型显示器开展加速寿命试验<sup>[8]</sup>, 对模型进行参数估计和检验,

收稿日期: 2020-04-12; 修订日期: 2020-11-09.

作者简介: 王乔方 (1970-) 男, 硕士, 研高, 主要从事光电技术研究。E-mail: qfangwang@sina.com.

基金项目: 国防科技工业技术基础科研支撑项目。

通过对加速试验失效时间数据的采集,分析温度应力对 OLED 微型显示器可靠性的加速影响特性,建立 OLED 微型显示器的可靠性分布模型,并对其可靠性指标进行评估,为 OLED 微型显示器工程应用提供理论依据。

## 1 数学模型

### 1.1 经典可靠性模型

产品在规定的条件下正常工作的概率为产品的可靠度,用  $R(t)$  表示<sup>[9]</sup>。 $T$  表示产品失效时间随机变量, $t$  表示规定的产品工作时间,则产品在规定时间  $t$  的可靠度用概率表示如下:

$$R(t) = P(T > t) \quad (1)$$

产品在规定时间  $t$  的累计失效分布函数用  $F(t)$  表示,  $F(t)$  与  $R(t)$  互补, 即:

$$F(t) = P(T < t) \quad (2)$$

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (3)$$

如果产品失效符合一定的数学规律,表示为产品的失效概率密度函数<sup>[10]</sup>,用  $f(\xi)$  表示,那么产品可靠度可以表示为:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\xi) d\xi \quad (4)$$

产品平均故障间隔时间为产品寿命的数学期望,即:

$$MTBF = \int_0^{\infty} tf(t) dt \quad (5)$$

通过方程(4)(5)可以求得产品的可靠寿命及产品平均故障间隔时间 (MTBF)。

### 1.2 威布尔分布模型

威布尔分布概率密度函数表示如下:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\theta$  和  $\gamma$  分别为特征寿命和形状参数。当  $\gamma=1$  时,威布尔分布变为指数分布;当  $\gamma=2$  时,威布尔分布变为瑞利分布。

威布尔分布函数表示如下:

$$F(t) = \int_0^t \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{\xi}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{\xi}{\theta}\right)^{\gamma}} d\xi = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}} \quad (7)$$

可靠度函数表示如下:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}} \quad (8)$$

产品失效符合威布尔分布,平均故障间隔时间表示为:

$$MTBF = \int_0^{\infty} t \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}} dt = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (9)$$

式中:  $\Gamma$  是伽马 (gamma) 函数。

### 1.3 Arrhenius 模型

贮存条件下产品承受的应力主要是温度应力,不同温度条件下材料内部化学反应速率不同,Arrhenius 模型是研究这类反应,并通过大量数据得到的模型。Arrhenius 模型反映了产品寿命与温度之间的关系,如式(10)所示:

$$\alpha = Ae^{E/KT} \quad (10)$$

式中:  $\alpha$  为产品特征寿命;  $A$  为常数 ( $A > 0$ );  $E$  为激活能,与材料属性及失效机理有关,单位为 eV;  $K$  为玻尔兹曼常数,为  $8.6 \times 10^{-5}$  eV/K。

### 1.4 威布尔分布参数估计

采用最小二乘法对威布尔分布进行参数估计<sup>[11]</sup>。对式(7)取双对数,得:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = \gamma \ln t - \gamma \ln \theta \quad (11)$$

令  $y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}$ ,  $x = \ln t$ ,  $a = \gamma$ ,  $b = \gamma \ln \theta$ , 式

(11)以线性形式表示:

$$y = ax - b \quad (12)$$

对线性方程采用最小二乘法估计,具有无偏性,方差最小等优点,因此,本文采用最小二乘法对参数进行预估。

## 2 试验

### 2.1 试验应力

加速寿命试验要求在不同试验温度下产品的失效机理不能发生变化。因此,温度选择不得大于产品的工作极限,不得大于产品材料能够承受的最大应力。本文选择  $T_1=90^{\circ}\text{C}$ 、 $T_2=80^{\circ}\text{C}$ 、 $T_3=70^{\circ}\text{C}$  三个温度作为试验应力。

### 2.2 失效判据

选择亮度衰减为起始亮度的 70% 作为加速寿命试验的失效判据。

### 2.3 试验样品

在一批产品中随机抽取 45 只器件,每组温度应力下 15 只,共 45 个样品。为保证每个样品质量合格,试验前应先进行至少 24 h 的老化试验,剔除不合格样品以及非正常失效样品,并对每个试验样品进行编号。对每个试验样品的起始亮度进行测试,并记录数据。

### 2.4 监测点设置

试验开始时, 测试 45 只产品的性能, 分别选取 70℃、80℃、90℃三个温度点, 以 240 h 为间隔, 从 240~2160h 时间段取 9 个检测时间点监测产品性能。

### 3 寿命评估

#### 3.1 试验结果

在  $T_1=90^\circ\text{C}$ 、 $T_2=80^\circ\text{C}$ 、 $T_3=70^\circ\text{C}$  时, 各监测点产品累计失效数如图 1 所示。

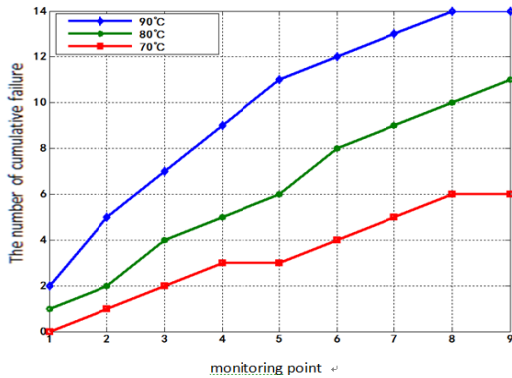


图 1 累计失效数

Fig.1 The number of cumulative failure

#### 3.2 失效分布函数计算

根据各个监测点失效数, 计算监测点的累计失效率  $F(t)$ 。根据  $F(t)$  和  $\ln t$ , 拟合式(11), 拟合结果如图 2 所示。

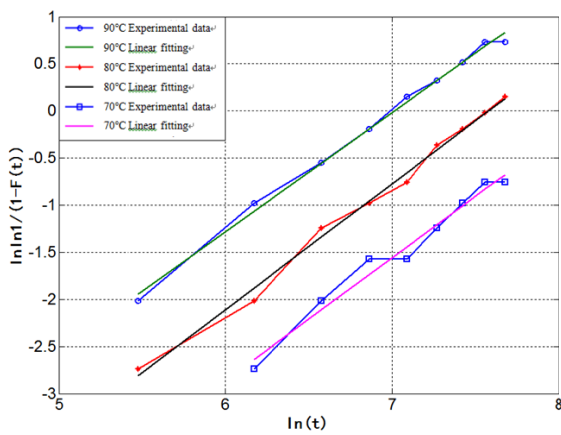


图 2 线性拟合结果

Fig.2 The result of linear fitting

90℃时拟合结果:  $Y=1.2643x-8.8698$ ,  $R^2=0.9957$ ,  $a=1.2643$ ,  $b=8.8698$ , 得到:  $\gamma=1.2643$ ,  $\theta=1113.8540$ ;

80℃时拟合结果:  $Y=1.337x-10.1360$ ,  $R^2=0.9941$ ,  $a=1.3370$ ,  $b=10.1360$ , 得到:  $\gamma=1.3370$ ,  $\theta=1960.8860$ ;

70℃时拟合结果:  $Y=1.3031x-10.6820$ ,  $R^2=0.9764$ ,  $a=1.3031$ ,  $b=10.6820$ , 得到:  $\gamma=1.3031$ ,  $\theta=3631.4070$ 。

威布尔分布  $\gamma$  代表分布形状参数, 反应失效机理,

两种应力下得到的参数  $\gamma$  相似, 反映了在两种应力条件下产品失效机理一致。

#### 3.3 可靠度函数计算

##### 1) 平均故障间隔时间

由拟合得到的失效概率密度函数, 得到产品平均故障间隔时间:

90℃:

$$\text{MTBF} = \int_0^\infty t \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} dt = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = 1034.55 \text{ h}$$

80℃:

$$\text{MTBF} = \int_0^\infty t \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} dt = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = 1799.11 \text{ h}$$

70℃:

$$\text{MTBF} = \int_0^\infty t \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} dt = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = 3348.16 \text{ h}$$

##### 2) 可靠度函数

根据式(8), 得到产品的 70℃时, 80℃时, 90℃时可靠度函数表达式如下所示:

$$70^\circ\text{C时: } R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{3631.407}\right)^{1.303}\right)$$

$$80^\circ\text{C时: } R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{1960.886}\right)^{1.337}\right)$$

$$90^\circ\text{C时: } R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{1113.854}\right)^{1.2643}\right)$$

70℃时, 80℃时, 90℃时可靠度函数如图 3 所示。

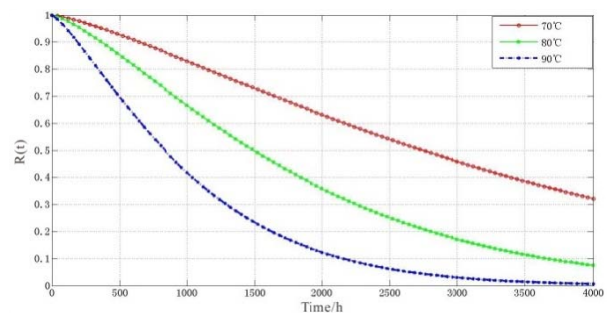


图 3 可靠度函数

Fig.3 Reliability function

#### 3.4 常温贮存寿命评估

根据高温贮存特征寿命, 采用 Arrhenius 模型, 得到激活能  $E=0.63$ 。

进一步根据 Arrhenius 加速模型, 90℃应力水平下获得常温 25℃的加速系数:

$$K_{25^\circ\text{C}-90^\circ\text{C}} = \exp\left[\frac{E}{K} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right)\right] = 83.2$$

根据 90℃时拟合结果 (特征寿命  $\theta=1113.8540$  h), 得到 25℃特征寿命:

$$\theta_{25^{\circ}\text{C}} = 1113.8540 \times 83.2 = 92672.6528 \text{ h}$$

最终, 得到常温 25℃ 贮存特征寿命约为 11 年。

## 4 结论

对试验数据基于威布尔分布模型, 应用经典可靠性理论, 最小二乘法进行参数拟合, 获得产品失效分布规律, 进而求得产品可靠性指标。分析结果表明, 该方法合理、简便、有效, 并且数据结果可以进一步应用到推导产品常温贮存寿命。

## 参考文献:

- [1] 王忆锋, 唐利斌, 岳清. OLED 器件寿命衰退模型的 MATLAB 分析计算[J]. 电子器件, 2010, 33(4): 412-415.  
WANG Yifeng, TANG Libing, YUE Qing. MATLAB Analysis and Computation of OLED Lifetime Degradation Model[J]. *Electron Devices*, 2010, 33(4): 412-415.
- [2] 张方晖, 席俭飞, 王秀峰. 硫系玻璃薄膜封装层对 OLED 寿命的影响[J]. 半导体光电, 2010, 31(1): 30-33.  
ZHANG Fanghui, XI Jianfei, WANG Xiufeng. Influence of Sulfide Glass Thin Film Encapsulation Layer on Lifetime of OLEDs[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(1): 30-33.
- [3] Eisenbrand F, Karrenbauer A, XU C. Algorithms for longer OLED lifetime[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, 4525: 338-351.
- [4] HAN C W, KIM H K, PANG H S, et al. Dual plate OLED display(DOD) embedded with white OLED[J]. *J. Display Technol.*, 2009, 5(12): 541-545.
- [5] NEISON W B. Accelerated Life Testing-step-stress Model Sand Data Analysis[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1980, 29(2): 103-108.
- [6] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 等. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
CHEN Xun, ZHANG Chunhua, WANG Yashun, et al. *Technology And Application of Accelerated Life Test*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.
- [7] ELSAYED A. *Reliability Engineering*[M]. 2nd (SECOND EDITION) , 1984.
- [8] 陈光宇, 张文, 张小民. 威布尔分布下系统全寿命周期成本建模与决策[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11): 2933-2940.  
CHEN Guangyu, ZHANG Chunhua, WANG Yashun. Modeling and decision-making of system lifecycle costs under Weibull distribution[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(11): 2933-2940.
- [9] ROLINK. Infrared Focal Plane Array Storage Life Assessment By Accelerated Aging[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 1998, 14(6): 425-432.
- [10] 蒋仁言. 可靠性模型及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.  
JIANG Renyan. *Reliability Model and Application*[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [11] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.  
ZHAO Yu. *Reliability Data Analysis*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014.
- [9] 徐军, 梁昌洪, 张建奇. 一种红外图像增强的新方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2000, 27(5): 14-17.  
XU J, LIANG C H, ZHANG J Q. A New Approach to IR Image Enhancement[J]. *Journal of Xidian University*, 2000, 27(5): 14-17.
- [10] 汪忱, 张宝辉, 王虹, 等. 基于视觉显著区域的红外图像增强算法研究[J]. 红外技术, 2017(9): 835-840.  
WANG C, ZHANG B H, WANG H, etc. Research on Infrared Image Enhancement Algorithm based on Visual Saliency[J]. *Infrared Technology*, 2017(9): 835-840.
- [11] 关文涛. 选择的艺术: Photoshop CS 图层通道深度剖析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 459.  
GUAN W T. *The art of choice: depth analysis of Photoshop CS layer channel*[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2006: 459.
- [12] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation[C]//*International Conference on Medical Image Computing & Computer-assisted Intervention*, 2015: 234-241.
- [13] Itti L. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [14] 王竑舒, 徐熙平. 广角相机图像的调焦评价函数研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2019(3): 38-41, 50.  
WANG H S, XU X P. Study on Focusing Evaluation Function of Wide-angle Camera Image[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition* , 2019(3): 38-41, 50.
- [15] GUO X, LI Y, LING H. LIME: Low-Light Image Enhancement via Illumination Map Estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(2): 982-993.
- [16] WANG S, ZHENG J, HU H M, et al. Naturalness Preserved Enhancement Algorithm for Non-Uniform Illumination Images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(9): 3538-3548.
- [17] Petro A B, Sbert C, Morel J M. Multiscale Retinex[J]. *Image Processing on Line*, 2014(4): 71-88.