

文章编号:1007-2780(2012)01-0061-05

基于 MAM 的白光 OLED 恒定应力加速寿命试验研究

张建平¹, 刘 宇², 成国梁³, 朱文清⁴, 刘 芳¹

(1. 上海电力学院 能源与环境工程学院, 上海 200090, E-mail:jpzhanglzu@163.com;
2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 3. 上海天逸电器有限公司, 上海 201611;
4. 上海大学 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

摘 要: 为了短时间内获得白光有机发光显示器(OLED)的可靠性寿命信息, 通过对其开展三组恒定电流应力加速寿命试验采集样品失效试验数据, 应用对数正态分布函数描述白光 OLED 的寿命分布。在图分析法(MAM)的基础上, 基于自行开发的寿命预测软件, 绘制了对数正态概率双坐标纸, 计算出白光 OLED 的平均寿命和中位寿命。数值结果表明, 白光 OLED 寿命服从对数正态分布, 加速寿命方程符合逆幂定律, 精确计算的加速参数使得对其寿命的快速估算成为可能。结果可为生产厂商和用户提供参考和指导。

关 键 词: 白光 OLED; 加速寿命试验; 对数正态分布; MAM

中图分类号: TN873⁺.3; TN383⁺.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20122701.0061

Constant Stress Accelerated Life Test of White OLED Based on MAM

ZHANG Jian-ping¹, LIU Yu², CHENG Guo-liang³, ZHU Wen-qing³, LIU Fang¹

(1. School of Thermal Power and Environmental Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China, E-mail:jpzhanglzu@163.com;
2. Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Ceramics, Shanghai 200050, China;
3. Shanghai Tianyi Electric CO., LTD, Shanghai 201611, China;
4. Key Laboratory of Advanced Display and System Applications of EMC, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to obtain the reliability life information of the white Organic Light-Emitting Diode (OLED) in a short time, failure data of OLED samples were collected by carrying out three groups of constant current stress accelerated life tests, and the lognormal distribution function was applied to describing the life distribution. The evolution of OLED's average life and the median life were achieved by applying the lognormal distribution to describing the life, and the self-developed life prediction software to plotting double coordinates' paper of lognormal probability, which based on map analysis method (MAM). Numerical results indicate that white OLED's life follows the lognormal distribution, that the acceleration model is consistent with inverse power law, and that the acceleration parameters which are accurately calculated make fast estimation of white OLED lifetime possible, which provides some significant guideline to its manufacturers and customers.

Key words: white OLED; accelerated life test; lognormal distribution; MAM

收稿日期: 2011-09-10; 修订日期: 2011-10-12

基金项目: 上海市科委项目(No. 11160500600, No. 10dz1140206); 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室(上海大学)资助(No. P201002); 上海市自然科学基金(No. 09ZR1413000, 11ZR1414200); 上海市教育委员会科研创新项目(No. 11ZZ172, 11ZZ171); 上海市教委重点学科(第五期, No. J51304); 上海市教委第三期本科教育高地建设项目

作者简介: 张建平(1972—), 男, 江苏南京人, 博士后, 教授, 主要从事机电产品寿命预测与可靠性分析、电磁除尘技术、新能源装置中关键部件的力学行为分析、储能技术等方面的研究。

1 引 言

人们对于有机电致发光现象的研究始于 20 世纪 30 年代中期,直到 1987 年,C. W. Tang^[1]成功研制了基于有机小分子的二层发光二极管(OLED),对有机电致发光器件的研究在理论上和实践上奠定了坚实的基础。OLED 具有全彩色、低能耗、广视角、响应快等优点,目前已经逐渐拥有电视、MP3 播放器、手机、汽车显示器、可弯曲标价牌的市场,并逐渐进入更加广泛的显示领域^[2]。OLED 的发展前景广阔^[3-4],被视为下一代最理想的显示技术,而寿命问题是其中的关键技术之一^[5-6]。

2006 年 7 月,Konica Minolta 技术中心成功开发了在 $1\,000\text{ cd/m}^2$ 初始亮度下,发光效率 64 lm/W 、亮度半衰期约 1 万小时的白光 OLED 器件,在 300 cd/m^2 初始亮度下,实现了 1.6 万小时的亮度半衰期^[7]。OLED 常规寿命试验需一年以上的试验时间,试验结果出来后产品已经更新换代,失去了试验的意义,因此,迫切需要进行加速寿命试验,以期在较短时间内精确估计其寿命。倪抒颖等^[8]设计并组建了一套可精确测量 OLED 电流密度-电压-亮度以及衰减曲线(亮度随时间的衰减)的自动测量系统。S. Kapil 等^[9]对导致 a-Si AMOLED 显示屏失效的主要因素进行了定性及定量分析,并制定了 TFT 像素电路加速应力测试的一般方法,但是,观察结果的应用范围受器件类型的限制。关于加速寿命试验,本文作者^[10-11]开展了真空荧光显示屏(VFD)恒定及步进应力加速寿命试验,精确预测了其寿命,使 VFD 开发人员可根据寿命信息来设计初始亮度。鉴于恒加速试验理论成熟、试验方法简单、试验结果较为准确^[10],本文对维信诺公司生产的 M00071 型 OLED 开展了恒定应力的加速寿命试验,并应用对数正态分布函数和图分析法完成了白光 OLED 的寿命预测。

2 实 验

2.1 加速应力的确定

OLED 是电流驱动^[12],并且电流应力容易改变,方便调控,所以使用电流作为加速应力来研究白光 OLED 的光衰。

2.2 加速应力水平和应力个数的选择

为了保证试验的准确性,最高应力和最低应

力之间应有较大间隔,最高应力不得大于该产品所能承受的极限应力,以免带来新的失效机理。根据可靠性原理,加速应力水平的个数不少于 3,每个应力下样品数目不小于 10,特殊产品不小于 5,并结合预备试验,这里选取 3 组应力水平^[13]: $I_1 = 9.64\text{ mA}$ 、 $I_2 = 17.09\text{ mA}$ 、 $I_3 = 22.58\text{ mA}$ 。此外,该试验样品正常工作时的电流为 $I_0 = 3.20\text{ mA}$ 。

2.3 失效标准和试验终止时间的确定

根据 OLED 的失效标准(测试位亮度低于初始亮度的 50%)^[14],记录每个试验样品的失效时间。当每个电流应力水平下的试验样品全部失效时,试验终止。

3 OLED 加速寿命试验基本理论

3.1 基本假定

假定 1:在电流应力 I 下,白光 OLED 寿命服从以下对数正态分布函数

$$F(t) = \Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] dz \quad (1)$$

式中: $z = (\ln t - \mu)/\sigma$, μ 为对数均值, σ 称为对数标准差。

假定 2:在正常工作应力 I_0 和各加速应力 I_i ($i=1,2,3$)下,白光 OLED 的失效机理不变。若各应力水平下对数标准差的估计值分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$,那么对数标准差 σ 可取加权平均

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^3 n_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^3 n_i} \quad (2)$$

式中: n_i 为第 i 个应力 I_i 下的样品总数, $n_1 = n_2 = 10, n_3 = 9$ 。

假定 3:对于白光 OLED,加速模型符合逆幂定律,即均值 μ 与电流应力水平 I 满足如下关系式:

$$\mu = \alpha + \beta \ln I \quad (3)$$

式中: α, β 为待估加速参数。

假定 4:Nelson^[15]于 1980 年提出了著名的原理:产品在应力 I_i 下,工作时间 t_i 积累的失效概率为 $F_i(t_i)$,相当于此产品在应力 I_j 下,工作时间 t_j 所积累的失效概率 $F_j(t_j)$,即为

$$F_i(t_i) = F_j(t_j) \quad (4)$$

3.2 恒定应力加速寿命试验数据统计分析

对式(1)做以下变换

$$\Phi^{-1}[F(t)] = \frac{1}{\sigma} \ln t - \frac{\mu}{\sigma} \quad (5)$$

令
$$x = \ln t, y = \Phi^{-1}[F(t)] \tag{6}$$

$$a = \frac{1}{\sigma}, b = -\frac{\mu}{\sigma} \tag{7}$$

则得到如下线性关系式：

$$y = ax + b \tag{8}$$

将失效时间 t_k 从小到大排序,对应的累积失效概率 $F(t_k)$ 采用中位秩公式计算：

$$F(t_k) = \frac{k - 0.3}{n_i + 0.4}, \quad k = 1, 2, \cdots, n_i \tag{9}$$

表 1 $I_1、I_2、I_3$ 恒定电流应力试验样品的失效时间

Table 1 Sample failure time of constant stress tests at I_1, I_2, I_3

电流应力/ mA	失效时间/h									
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}
I_1	1 691.5	2 084.67	2 100.32	2 374.5	2 421.50	2 586.00	2 621.50	2 680.50	2 868.00	2 879.50
I_2	601.50	689.67	697.33	716.50	785.50	854.50	889.50	1115.67	1131.33	1251.50
I_3	406.00	440.50	463.50	532.50	555.50	643.67	651.33	716.50	762.50	-

5 基于图分析法的试验数据处理

图分析法主要是在概率纸上进行,检验失效分布类型、进行参数估计,从而得出产品的寿命信息。本文利用 MATLAB 简便的矩阵运算、快速的数值分析和强大的绘图功能,实现了基于图分析法的白光 OLED 加速寿命试验。

5.1 绘制对数正态概率双坐标纸

首先利用 MATLAB 中的 normplot 函数创建对数正态概率纸,形成 $tF(t)$ 坐标系。由于对 OLED 寿命分布直线进行图分析法所使用的横坐标值是 $\ln(t)$,所以在 $tF(t)$ 坐标系的基础上创建第二个坐标系 $\ln(t)-\Phi^{-1}[F(t)]$,构成对数正态概率双坐标纸^[7],如图 1 所示。

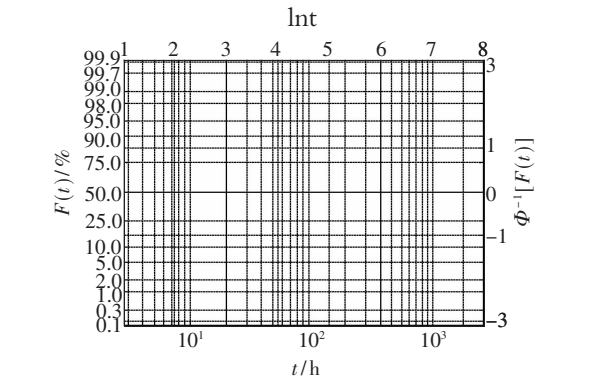


图 1 对数正态概率双坐标纸

Fig. 1 Double coordinates paper of normplot probability

这样就得到一组实验数据

$$[t_k, F(t_k)], k = 1, 2, \cdots, n_i \tag{10}$$

根据式(6)将式(10)转化为

$$(\ln t_k, \Phi^{-1} F[t_k]) = (x_k, y_k) \tag{11}$$

4 试验数据

恒定电流应力水平为 $I_1 = 9.64 \text{ mA}$ 、 $I_2 = 17.09 \text{ mA}$ 和 $I_3 = 22.58 \text{ mA}$ 的试验样品的失效时间如表 1 所示。

5.2 恒定应力试验数据计算与分析

导入恒定应力 $I_1、I_2$ 和 I_3 下的失效时间,利用式(9)求出每个应力下累积失效概率 $F(t_k)$,通过对数正态概率双坐标纸,对整理好的三组恒定应力 $I_1、I_2$ 和 I_3 下的失效数据 $(\ln t, \Phi^{-1}[F(t)])$ 进行描点,采用 polyfit 函数进行拟合,对数均值

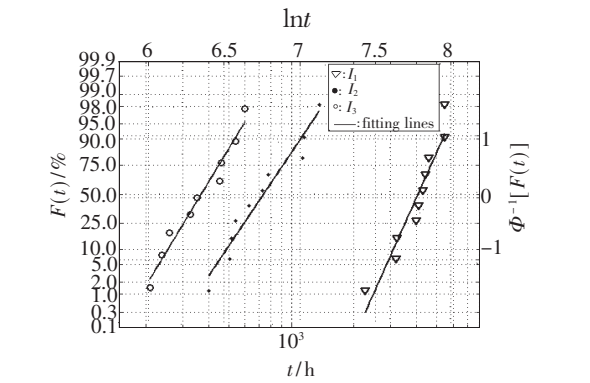


图 2 恒定应力统计曲线

Fig. 2 Statistics curves of constant stress

表 2 各应力下的对数正态分布参数

Table 2 Lognormal distribution parameters at each stress

应力	$I_1 = 9.64 \text{ mA}$	$I_2 = 17.09 \text{ mA}$	$I_3 = 22.58 \text{ mA}$
μ_i	7.773 1	6.744 5	6.332 0
σ_i	0.184 2	0.276 2	0.249 1
R^2	0.915 0	0.949 0	0.969 5

$\mu_i (i = 1, 2, 3)$ 、对数标准差 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 及其决定系数的计算结果如表 2 所示。此外,图 2 给出了 3 组应力的拟合直线,每组应力下的 $\ln t$ 与 $\Phi^{-1}[F(t)]$ 基本呈线性关系,拟合程度较高。

5.3 加速寿命方程

将表 2 中的数据 $(\ln I_i, \mu_i) (i = 1, 2, 3)$ 依次描在 $\ln I - \mu$ 坐标纸上,进行曲线拟合,结合式(3)得到 $\alpha = 11.6321$, $\beta = -1.7085$, 则加速寿命方程为:

$$\mu = 11.6021 - 1.7085 \ln I \quad (12)$$

加速寿命曲线如图 3 所示,实际上是寿命特征图,其拟合直线的线性相关系数 $R^2 = 0.9980$, 接近于 1, 说明线性相关程度非常好,这证实了白光 OLED 的加速模型完全符合逆幂定律的假定。

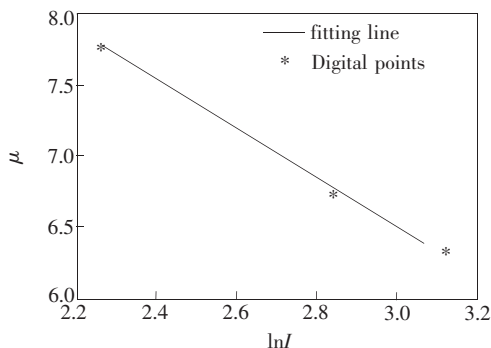


图 3 I_1 、 I_2 、 I_3 寿命特征图。

Fig. 3 Life-span characteristic figure of stress I_1 , I_2 , I_3 .

5.4 寿命估计

结合式(1)、(2)、(3)和(4)可得:

$$\tau_{ji} = \frac{t_j}{t_i} = \left(\frac{I_j}{I_i} \right)^\beta \quad (13)$$

式中: β 为加速寿命方程(3)中的斜率,即为加速参数。由式(13)可得:

$$t_j = \tau_{ji} t_i \quad (14)$$

根据式(14),利用在 I_i 应力下的试验时间 t_i , 就可以求出相当于在应力 I_j 下的试验时间 t_j 。

根据加速系数的定义,在式(13)中令 $j = 0$, 可得产品在正常工作应力 I_0 下相对于加速应力 $I_i (i = 1, 2, 3)$ 的寿命加速系数的表达式

$$\tau_i = \tau_{0i} = t_0 / t_i = \left(\frac{I_0}{I_i} \right)^\beta \quad (15)$$

当白光 OLED 寿命服从对数正态分布时,加速应力 I_i 下的平均寿命 $\bar{\mu}_i$ 和中位寿命 $t_{0.5}^i$ 分别为:

$$\bar{\mu}_i = e^{(\mu_i + \frac{1}{2}\sigma_i^2)}, t_{0.5}^i = e^{\mu_i} \quad (16)$$

结合式(16),便可计算出 OLED 在 I_0 下的平均寿命 $\bar{\mu}_0$ 和中位寿命 $t_{0.5}$ 分别为:

$$\bar{\mu}_0 = \tau_i \cdot \bar{\mu}_i, t_{0.5} = \tau_i \cdot t_{0.5}^i \quad (17)$$

将 $\beta = -1.7085$ 代入式(15)分别求得 OLED 在 3 个应力 I_i 下的加速系数: $\tau_1 = 6.5806$, $\tau_2 = 17.5033$, $\tau_3 = 28.1724$ 。根据式(2),对表 2 中 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 取加权平均可求出对数标准差 $\sigma = 0.2361$, 结合表 2 中对数均值 μ_i , 并根据式(16)求得 I_i 下的平均寿命和中位寿命分别为: $\bar{\mu}_1 = 2412.81$ h, $t_{0.5}^1 = 2346.51$ h, $\bar{\mu}_2 = 907.13$ h, $t_{0.5}^2 = 882.2$ h 和 $\bar{\mu}_3 = 563.59$ h, $t_{0.5}^3 = 548.12$ h。因此,利用式(17)便可计算出 I_0 下的 OLED 平均寿命为 $\bar{\mu}_0 = \bar{\mu}_1 \tau_1 = \bar{\mu}_2 \tau_2 = \bar{\mu}_3 \tau_3 = 15877.8$ h, 采用同样的方法可得到中位寿命为 $t_{0.5} = 15441.5$ h。因此,在确定了白光 OLED 的加速参数 $\beta = -1.7085$ 之后,开展一组最高电流应力的加速寿命试验,计算该应力下白光 OLED 寿命,乘以相应的加速系数后便可获得正常工作时的寿命,通过这种方法可确保在较短的时间内预测白光 OLED 的寿命。

目前,白光 OLED 市场证明其平均寿命在 1.6 万小时左右,不同的结构,材料和工艺会造成产品的寿命有一定差异,本文得到的白光 OLED 平均寿命与客户反馈数据比较接近。

6 结 论

(1) OLED 每个电流应力 $I_i (i = 1, 2, 3)$ 下的失效数据点近似为一条直线,这证实了白光 OLED 产品的寿命服从对数正态分布,这 3 条直线近似平行也充分说明了 3 个加速应力水平下产品失效机理与正常应力水平下相同;

(2) 基于 MATLAB 的图分析法,与手工绘图、手工分析的图分析方法相比,可观性强、可视化好,分析速度快、估计精度高,采用 MATLAB 自行开发的寿命预测程序,设计简单、适用范围广、容易上手,使得白光 OLED 的寿命预测更具有实际应用价值。

(3) 精确地计算出预测白光 OLED 寿命所用到的关键性参数,确保以后在很短的时间内便可估算出正常应力下的寿命,可以节省试验时间,大大降低试验成本。

参 考 文 献:

[1] Tang C W, VanSlyke S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(12):913-915.

[2] 万博泉, 谢静. OLED 显示技术近期进展及赶超机遇 [J]. *电子产品世界*, 2007, (7):56-64.

[3] 马颖, 韩薇, 张方辉, 等. 发光层混合掺杂的白光 OLED 器件[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(1):40-43.

[4] 张静, 张方辉, 阎洪刚. HAT-CN 作为空穴注入层的高效白色荧光有机电致发光二极管[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(4):490-495.

[5] 陈柳, 俞宏坤, 曾 韡, 等. N&K 多功能薄膜分析仪在 OLED 失效分析中的应用[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(4):582-584.

[6] 余树福, 胡典钢, 王坚, 等. 多通道 OLED 器件寿命分析测试系统研制[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(4):532-537.

[7] 常天海, 彭双庆. OLED 应用技术的进展[J]. *真空与低温*, 2008, 14(2):115-118.

[8] 倪抒颖, 吴有智, 孙润光, 等. 有机电致发光器件自动测量系统[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2004, 10(4):337-340, 348.

[9] Kapil Sakariya, Clement K M Ng, Peyman Servati, *et al.* Accelerated stress testing of a-Si:H pixel circuits for AMOLED displays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 52(12):2577-2583.

[10] Zhang Jianping, Wang Ruitao. Reliability life prediction of VFD by constant temperature stress accelerated life tests and maximum likelihood estimation [J]. *J. Testing And Evaluation*, 2009, 37(4):316-320.

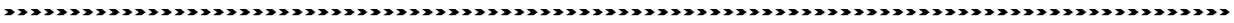
[11] 张建平, 王睿韬. 基于 MAM 的真空荧光显示器寿命预测[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(6):775-770.

[12] 张雷, 杨良勇, 吕国强, 等. 一种微型 OLED 显示屏驱动接口电路[J]. *液晶与显示*, 2006, 21(6):726-731.

[13] 崔晓英. GaAs 器件寿命试验及其方法比较[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2009, B10:80-85.

[14] 刘熙娟, 温岩, 朱绍龙. 白光 LED 的使用寿命的定义和测试方法[J]. *光源与照明*, 2001, (4):16-22.

[15] Nelson W B. Accelerated life testing step stress models and data analyses [J]. *IEEE Transaction on Reliability*, 1980, 29(2):103-108.



组合单位加词头的规则

- a. 通过单位相乘构成的组合单位,通常词头加在第 1 个单位前面。例如: $\text{N} \cdot \text{s}$ 加词头 k,应为 $\text{kN} \cdot \text{s}$ 。但常见的法定单位中有 2 个单位例外。一个是电阻率的单位 $\Omega \cdot \text{m}$,通常写成 $\text{k}\Omega \cdot \text{m}$, $\text{M}\Omega \cdot \text{m}$,但当加词头 c 时,则要写成 $\Omega \cdot \text{cm}$;另一个是货运量单位“吨公里”写成 $\text{t} \cdot \text{km}$ 。
- b. 通过单位相除或相乘除(分数形式)构成的组合单位,词头一般加在分子的第 1 个单位前,分母一般不加词头。例如:摩尔嫡单位 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 加词头 k,应写成 $\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$,不能写成 $\text{J}/(\text{mmol} \cdot \text{K})$,虽然 $\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = \text{J}/(\text{mmol} \cdot \text{K})$,但 $\text{J}/(\text{mmol} \cdot \text{K})$ 是不规则的。
- c. 一般不在组合单位的分子分母同时加词头。
- d. 组合单位的分母为长度、面积、体积单位或分子为 1 时,分母可按习惯与方便选用某些词头。
- e. 质量单位 kg 例外。