

LED 可靠性评估的加速寿命试验设计方法

孙晓君, 谢劲松

(北京航空航天大学可靠性工程研究所, 北京 100191)

摘要: 介绍了一种关于发光二极管(LED)可靠性评估的加速寿命试验设计方法。通过这个方法, 在针对LED的性能退化现象和运行不稳定问题进行加速试验设计时, 可以在已知目标可靠度和置信度的前提下, 定量地确定满足可靠性要求的试验用样本量、加速应力水平以及试验时间。同时, 用于发光二极管加速寿命试验的基本设计思想, 可以广泛地应用于常见电子元器件的器件产品质量认证或可靠性评估等试验设计中。

关键词: 发光二极管; 可靠性评估; 置信度; 加速寿命试验; 加速试验设计

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5468 (2009) 03-0020-06

Accelerated Life Test Design for the Reliability Assessment of LEDs

SUN Xiao-jun, XIE Jing-song

(Institute of Reliability Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper presents an accelerated life test design methodology for the reliability assessment of light emitting diodes (LEDs). Using this methodology, the degradation behavior and the performance uncertainties of LEDs are considered in the design to determine the sample size, accelerated stress conditions, and test duration for a given value of targeted reliability and confidence level. Although discussions in this paper are mostly limited to light emitting diodes, the basic idea of the methodology can be applied to the accelerated test design of electronic components in general for component qualification and/or reliability assessment.

Key words: LED; reliability assessment; confidence level; accelerated life test; accelerated test design

1 引言

元器件和仪器设备生产厂商都越来越重视元器件级的可靠性试验, 但具体的试验目的和方法却不尽相同, 其中, 元器件生产厂商是为了确定产品的可靠性质量; 而仪器设备生产厂商则从器件供应商那里获得相关器件的可靠性试验内容和数据结果,

从而明确为达到产品可靠性设计要求需要选用何种器件^[1]。

如今, 半导体发光器件的应用已突破传统的半导体应用领域, 越来越广泛地应用于各式各样的电子组件及产品中, 例如: 可见信号及传感器等光敏感设备, 甚至于包括房屋、汽车在内的相关照明设

收稿日期: 2008-12-26 修回日期: 2009-06-02

作者简介: 孙晓君(1986-), 女, 安徽黄山人, 北京航空航天大学工程系统工程系(可靠性工程研究所)硕士研究生, 研究方向为元器件和电子产品可靠性。

备^[2]。然而,在这些设备的可靠性相关问题上尚缺乏有效的定量化的评估方法,这包括工作寿命、平均无故障时间(MTTF)以及失效概率等可靠性基本问题。在现阶段,很多厂商在选用半导体发光器件时,大多参考供应商提供的、基于美军标 MIL-HDBK-217(或其衍生标准)试验得到的相关信息来对器件进行可靠性评估,然而实际上,只有很少的供应商能提供直接的、定量的、与性能特性相关的器件可靠性信息,这样一来,这些标准所提供的、传统的、不考虑样本量和置信度的可靠性评估方法,能否有效地解决实际工业问题就成为了业内的一个热门话题^[1, 3]。

长时间的寿命试验^{注①}依然是现今对半导体发光器件进行可靠性评估的一种有效手段^[4-5],但考虑到试验成本高、试验周期长、产品更新换代快的现状,寿命试验逐渐被试验时间恒定在1 000 h的可靠性加速试验所取代;同时,为了保证不同样本量下进行的加速试验均具有较好的准确性和一致性,相关部门还制定了一系列的加速环境应力试验标准,如:上电的温湿度试验、温度循环试验、热冲击试验、高温/低温存储试验^[6-8]。但是,由于任何一种试验(或试验标准)都不能很好地解释如下情况:试验条件及结果与实际使用产品可靠性之间的联系,所以,即便使用的器件通过了试验筛选,仍不能肯定器件是否符合产品可靠性的设计要求、是否可以应用于实际的工作环境。

虽然加速试验存在一些不足,现阶段也没有一个有效的工业试验标准,但加速寿命试验仍然是现阶段半导体发光器件筛选的常用方法,试验所提供的直观的试验结果,可以客观地反映器件在工作环境中的工作寿命,从而为筛选提供依据。

由于实际使用中,半导体发光器件的可靠性要求具有随着用户需求而变化的特点,基于此,本文提出一套针对半导体发光器件的加速寿命试验方法。文中采用了对数正态分布作为器件随时间变化的失效分布函数分析,摒弃了传统的指数分布形式,同时提供了一套用于验证产品可靠性要求的加速寿命试验设计方法。利用这种方法,在已知目标可靠度、置信度和预期试验时间的情况下,就可以确定加速应力条件和样本量,从而定量地确定器件

可靠性。

2 器件的可靠性要求

器件或组件在具体的设计和使用中通常都会明确地提出可靠性指标或破坏极限等具体的可靠性要求,例如:一个产品在设计 and 制造环节中,其总的失效率或产品缺陷率要求为100 ppm,那么该产品在保修期内的可靠度则为99.99%,而产品中使用的器件在保修期内的可靠度则应高于99.99%。

通常,器件的可靠性要求包括:工作寿命、性能极限和工作条件等。其中,工作寿命与产品保修期时间相关;性能极限则与可靠性评估中的失效判据相关。对于半导体发光器件,在没有被彻底破坏时,一般认为其工作寿命在 $10^5 \sim 10^8$ h左右^[2, 9]。而在实际使用中,根据需求的不同,其工作寿命通常在几千小时以上。当性能要求或失效判据条件不同时,器件的工作环境条件决定了它是否能处于正常的工作状态中。

对于一般的发光器件,功率输出一般通过测量发光强度来确定,单位:坎德拉(candela)^{注②},即瓦特每单位立体角(W/steradian或W/sr),且完成基本功能时的输出即是其最小功率输出。而对于发出可见光的器件,其发光强度决定了人肉眼可见的光的亮度。一般来说,在制定器件的性能极限(或失效判据)标准时,不仅需要考虑产品自身的特性参数和工作条件,还需要考虑市场需求等其它因素。也就是说,当一个光源的光输出 I_v 低于需求的最低限 $I_{v, \min}$ 时,就认为其失效。

$$0 \leq I_v \leq I_{v, \min} \quad (1)$$

众所周知,半导体发光器件的结温过高时会导致器件失效,而结温是由器件所处的工作条件(主要包括工作电流和外界工作环境两大部分)决定的,不同的半导体工艺和应用条件下的器件,工作电流可从10 mA至100 mA不等。

3 正常工作条件下的加速寿命试验

本部分研究的重点在于如何利用加速寿命试验来准确地反映半导体发光器件在实际工作条件下(即不加速条件)的可靠性性能指标。例如:一个发光二极管(LED)在产品系统设计时,其工作电

注:①长时间寿命试验是指:器件在试验条件下,正常工作6个月(或5 000 h)以上。

②1坎德拉=1流明/立体角。

流约为 10 mA,但在可靠性评估或器件筛选的加速寿命试验中,其工作电流可能会达到 50 mA 甚至 80 mA,那么如何才能准确地利用试验结果来评价器件在 10 mA 载荷下的工作寿命(或失效时间)。对可靠性工程师而言,更希望通过加速寿命试验来了解已选择使用的器件的可靠度或失效率,从而确定产品的保修期,同时明确在 99.99%的可靠度要求和式(1)定义的失效判据条件下,器件在 10 mA 电载荷条件下的工作寿命。

为解决上述问题,需要建立一个与半导体发光器件加速寿命试验相关的物理模型,一个常见的关于工作电流 I 和失效时间 t 的经验公式如下^[9]:

$$t \propto I^{-n} \quad (2)$$

式(2)中: n 是一个由器件自身参数决定的经验参数,如半导体技术、制造过程、封装和环境条件等有关决定器件自身特性的参数。

对第 i 次抽样而言,公式可变为:

$$t_i = C_i I^{-n} \quad (3)$$

式(3)中: C_i 是一个取决于样本的常量。

那么,若失效时间的几何平均数为 \bar{t} ,则对 m 次取样有如下关系:

$$\bar{t} \equiv \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m t_i} = C I^{-n} \quad (4)$$

式(4)中: C 是一个常量。

图1所示为试验后记录在对数正态坐标纸上的、关于LED随时间的累积失效率统计结果,其中数据间良好的线性关系表示半导体发光器件随时间的累积失效率符合一个对数正态分布,其失效概率密度函数表示如下^[11]:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu')^2}{2\sigma'^2}\right] \quad (5)$$

式(5)中: μ' 和 σ' 表示符合正态分布规律的随机变量的均值和标准差。比较公式(4)和公式(5)可知:

$\exp(\mu') \propto I^{-n}$ 其中:当 $m \rightarrow \infty$ 时, $\bar{t} \rightarrow \exp(\mu')$ (6)

由式(4)~(6)的推导过程可知,加速寿命试验条件和实际工作条件下样本参数之间的关系,以及试验中的关于样本的可靠度函数。

假设, m 组样本进行试验,在加速寿命试验条件下对应的工作电流分别为 I_1 和 I_2 ,则每组样本的失效时间分别为:

电流为 I_1 时,失效时间记为 t_{1i} , $i=1, 2, \dots, m$;

电流为 I_2 时,失效时间记为 t_{2i} , $i=1, 2, \dots, m$ 。 (7)

将式(7)结果分别代入式(4),解得 C 和 n 表达式如下:

$$C = \exp\left(\frac{\ln \bar{t}_1 \ln I_2 - \ln \bar{t}_2 \ln I_1}{\ln I_2 - \ln I_1}\right) \quad (8)$$

$$n = -\frac{\ln(\bar{t}_1/\bar{t}_2)}{\ln(I_1/I_2)} \quad (9)$$

其中:

$$\bar{t}_1 \equiv \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m t_{1i}}, \quad \bar{t}_2 \equiv \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m t_{2i}} \quad (10)$$

对于任意一个工作电流 I_{op} ,由下式即可预计失效时间 \bar{t}_{op} 为:

$$\bar{t}_{op} = C I_{op}^{-n} \quad (11)$$

在上述加速寿命试验中,在其它外界环境条件因素保持不变的前提下,加速应力参数即为电流。已知失效时间 \bar{t}_{op} ,那么与失效时间相关的其它参量均可确定:式(5)中的 μ' 可依据式(6)通过 $\ln \bar{t}_{op}$ 求出,而 σ' 在对数正态分布中不是加速应力的函数,可以通过式(7)的试验结果得到。同时,可以确定式(5)所示的失效概率密度分布函数,参考式(1)提出的失效判据,设定变量上下限,对函数积分,即可得到工作条件下的失效概率或可靠度。

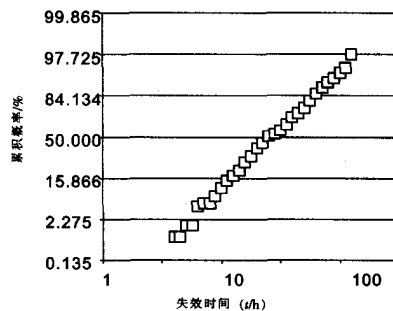


图1 对数正态坐标纸上的关于LED随时间的累积失效率统计
(数据来自LED样本,其工作电流100 mA,发光波长600~650 nm)

4 加速寿命试验的设计步骤

前文给出了一个对半导体发光器件加速寿命试验结果进行分析,从而得到相关可靠度信息的方法。接下来,将讨论一个考虑加速寿命试验的目标

可靠度、置信度等其它参量，从而最终确定加速寿命试验其它相关参量的方法，如：样本量、加载应力条件（如上例中的电流）和试验时间。由于这些参量，尤其是与成本和时间密切相关的样本量和试验时间，它们之间存在一定的内部联系和相互制衡，例如：要达到高可靠度和置信度要求，就需要大样本量和长试验时间，所以，在工业上最常见的处理方法是将置信度降低，一般定在 80%，以期望达到试验成本和试验要求结果之间的平衡。

可靠性试验设计的宗旨是：确定可以达到可靠性置信度要求的最小样本量和试验测试时间等条件。如果希望在实际工作环境中具有高可靠性，那么就需要通过大量的样本和长时间的试验测试来证明失效是一个小概率事件，因此，加速试验设计的目标是：通过提高应力条件来降低可靠度或增加失效率，并在小样本量条件下达到相同的置信度水平。在加速试验完成后，对其结果进行分析即可得到实际工作条件下的可靠度值和置信度水平。

在明确目标可靠度和置信度之后，剩下的 3 个与半导体发光器件加速寿命试验相关的参量可以通过以下 3 个步骤得到。

a) 步骤 1：确定和

第一步首先明确样本及可靠性要求，并通过样本试验结果，依照式 (5) 求得参数 μ' 和 σ' ，从而最终估计出产品随时间的失效分布情况。

若在工作电流 I 和目标可靠度 R 条件下对样本进行试验，得到工作寿命为 t_{life} ，则均值 μ' 表达式如下：

$$\mu' = \ln t_{life} + k\sigma' \quad (12)$$

式 (12) 中： σ' 是一个变量，通过依照以往的试验经验结果，甚至于最糟糕的实际情形来确定；

k 是一个正数，与目标可靠度 R 存在如下关系：

$$R = \int_{-k}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (13)$$

图 2 所示的曲线为关于随机变量失效时间的对数正态分布（即关于变量的正态分布），且标有 (2) 和 (3) 的阴影部分即为目标可靠度 R 。

b) 步骤 2：明确样本量 W ，置信度 CL ，以及试验总时间 t_a

由图 2 可以看出，当加载的应力增大时，整个失效分布曲线会左移，这种变化表示可靠度在降低。正如图 2 所示，右侧曲线表示在正常工作条件

下的失效分布，左侧曲线表示在加速条件下的失效分布，在相同的工作寿命 t_{life} 下，两条曲线相比较，相应的可靠度在降低，即由 (2) 和 (3) 所示阴影变化至 (1) 和 (2) 所示阴影，所以，在加速条件下，要想达到相同的可靠度要求，相应的失效寿命时间 t_{life} 也要降低。而为了明确加速试验的失效分布曲线，需要进行如下过程。

在可靠性试验中，置信度 CL 、样本量 W 和目标可靠度 R 之间存在如下关系 [10]：

$$CL = 1 - R^W \quad (14)$$

而在实际的可靠性试验中，样本量越少可靠度越低，因此，为达到与实际情况相同的置信度，需要增大加载应力水平或延长试验时间。然而，在加速寿命试验中，一般不希望延长试验时间；而为了避免引入新的实际工作环境中不会出现的失效机理，一般也不希望加载过高的应力；同时为了控制成本，也不希望使用过多的样本。

在已知置信度 CL 时，还需要知道目标可靠度 R 和样本量 W 中的任一个，才可以求得第 3 个变量。在实际工作环境下，通常目标可靠度 R 已知，根据式 (14) 样本量 W 很容易确定。例如：当目标可靠度为 99%，置信度为 80% 时，其相应样本量为 160。但是，在加速试验条件下，其目标可靠度 R_x 未知，且与实际工作条件下的目标可靠度 R 不同，所以，一般会采用尝试不同样本量值以确定目标可靠度 R_x 的方法。对于半导体发光器件的加速寿命试验，依据试验装置、样品、测试时间和成本要求的具体情况，样本量一般在 20 至 100 之间不等。在实际操作中，加速试验条件并不一定能通

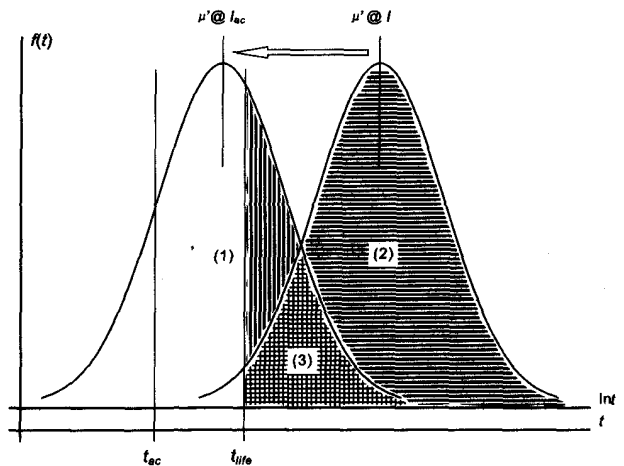


图 2 半导体发光器件随时间的失效分布以及在工作电流变化时分布的变化情况

过一次试验而最终确定,所以需要多样本量的反复试验对不同的情形进行摸底,同时结合步骤3中确定的加速应力水平进行综合的判断,若应力水平过高,则需要增大样本量,重新选择计算,从而最终确定试验条件和样本量的最佳结合点。

参数 t_{ac} 的确定与工业条件、试验时间和成本相关,对于半导体发光器件,寿命试验一般在 1 000 h,前后持续 1 个半月^[3-5]。

c) 步骤 3: 确定加速试验加载应力大小 I_{ac} , 并验证试验设计

经过前两个步骤确定了置信度和样本量后,代入式(14)即可得到在加速应力条件下的目标可靠度 R_{ac} , 即图 2 中的阴影部分(1)和(2),从而进一步确定加速条件下的随时间的失效分布情况。相关结果如下:

1) 将目标可靠度 R_{ac} 代入式(13)可求得加速条件下的 k 值(或者 k_{ac});

2) 将加速条件下的各个参量(如: t_{ac} 、 k_{ac})代入式(12),得加速条件下分布曲线相对正常工作条件的移动距离大小:

$$\Delta\mu' = \mu' - (\ln t_{ac} + k_{ac}\sigma') \quad (15)$$

3) 依据式(6)中给出的正常条件下和加速条件下的工作电流之间的关系,将上式中求得的 $\Delta\mu'$ 带入,得:

$$I_{ac} = I \exp\left(-\frac{\Delta\mu'}{n}\right) \quad (16)$$

上式中 n 与 I_{ac} 均未知,故要得到 I_{ac} , 首先需要确定 n 。对于半导体发光器件而言,从器件制造商或供应商提供的相应资料上可以估计出额定电流下的工作寿命,而通过对若干样本的简单快速的测试即可得到在一定过应力条件下(如: 100 mA)的失效时间,代入式(9)即可得到 n 的大小,从而进一步得到 I_{ac} 。

5 应用案例

本部分将一个 LED 的加速寿命试验作为案例来验证上述理论。LED 的可靠性要求如下:

1) 工作电流 50 mA DC, 工作时间 50 000 h, 可靠度不低于 99.865 %;

由此可得 LED 的失效判据,表 1 所示为 LED 相关的可靠性参数。

接下来对可靠性试验所需参数进行设计。

步骤 1: 假定已知 $\sigma' = 3$, 则

表 1 LED 的相关可靠性参数

参数	特征值
工作电流 I	50 mA
寿命要求 t_{life}	50 000 h
目标可靠度 R	99.865 %

$$\mu' = \ln 50\ 000 + 2\sigma' = 16.8 \quad (17)$$

相当于试验用 LED 样本的平均失效时间约为 2 千万小时。

步骤 2: 假定置信度为 85 %, 样本量为 32, 试验时间 1 000 h, 代入式(14)得:

$$85\% = 1 - R_{ac}^{32} \quad (18)$$

即: 加速寿命试验目标度 R_{ac} 为 94.3 %。

步骤 3: 将以上结果代入式(13)和式(15), 求得: $k = 1.27$, $\Delta\mu' = -6.1$ 。

若 $n = 18$, 则由式(16)可知加速试验中电流 $I_{ac} = 70$ mA。

由以上结果最终可知,在加速寿命试验中,32 个 LED 样本,在 70 mA 工作电流下,正常工作 1 000 h,即可满足提出的可靠性要求。

6 结束语

本文主要讨论了适用于工业条件下的、器件筛选和器件质量保证等环节的、半导体发光器件的加速寿命试验设计方法,以及关于可靠性预计评估的试验数据分析处理方法。通过该方法及加速寿命试验,可以定量地确定半导体发光器件的可靠性相关信息。

参考文献:

- [1] IEEE std 1413.1™-2002, IEEE guide for selecting and using reliability predictions based on IEEE 1413 [S].
- [2] CRAFTORD M G. LEDs challenge the incandescents [J]. Circuits and Devices, IEEE, 1992, (9): 4-29.
- [3] MIL-HDBK-217F-1991, Reliability prediction of electronic equipment [S].
- [4] Application Brief I-021-1999, Long term reliability data for allInGaP LEDs [S].
- [5] Application Brief I-024-1999, Pulsed operating ranges for allInGaP LEDs vs. projected long term light output performance [S].
- [6] JEDEC Standard JESD22-A100-B-2000, Cycled temperature-humidity-biased life test [S].
- [7] EIA/JEDEC Standard EIA/JESD22-A101-B-1997, Steady

- state temperature humidity bias life test[S] .
- [8] JEDEC Standard JESD22-A103-A-1989, High temperature storage test [S] .
- [9] OTT M. Capabilities and reliability of LEDs and laser diodes [R] . NASA Goddard Space Flight Center, 1997.
- [10] HU J M. A technique to reduce sample size in accelerated reliability qualification tests [J] . Mechanics and Materials for Electronic Packaging: Vol.1 - Design and Process Issues in Electronic Packaging, ASME, 1994, 195: 117-123.
- [11] KORN G A, KORN T M. Manual of mathematics [M] . New York: McGraw-Hill, 1967.

信息与动态



2009 年第十三届全国可靠性物理学术讨论会

征文通知

2009 年第十三届全国可靠性物理学术讨论会定于 2009 年 10 月 19~22 日在江西省玉山县贵源宾馆召开, 特向全国广大电子产品可靠性物理工作者征集学术论文。征文内容:

- (1) 可靠性物理研究分析的方法、技术与手段;
- (2) 电子元器件及材料在各种应力或非应力条件下的失效模式、机理及对策;
- (3) DPA 技术与方法;
- (4) 电子产品静电损伤、辐射损伤及对策;
- (5) 系统、整机、组件的 FMECA、FTA 等分析技术;
- (6) 软件质量与可靠性评价技术;
- (7) 筛选及老练方法与技术, 可靠性快速评价技术等;
- (8) 专题论坛: 国内外可靠性物理发展新动向新技术 (有外宾发言)。

本次会议论文集由《电子产品可靠性与环境试验》期刊公开出版发行

(国际标准连续出版物号: ISSN 1672-5468, 国内统一连续出版物号: CN 44-1412/TN)。

特别提请注意: (1) 文稿版芯尺寸必须是

25×17 cm, 正文 5 号字, 行距要密, 通栏形式; (2) 请作者和单位严格保密审查; (3) 文章严格把好文字质量关; (4) 论文作者必须参加年会。

征文 (附电子版) 请于 2009 年 8 月 1 日前寄到广州 1501 信箱 34 分箱盛志森 (510610) 联系电话/传真: 020-87237183 (办) 87236363 (宅)。E-mail: klx@ceprei.com

会议报到日期和地点: 2009 年 10 月 19 日, 江西省玉山县贵源宾馆 (长途汽车站对面)。

主办单位

中国电子学会可靠性分会 元件分会 半导体及集成技术分会 电子材料分会

中国仪器仪表学会泛珠三角区域分会联盟

广东省电子学会 广东省仪器仪表学会

电子元器件可靠性物理及其应用技术国家级重点实验室

电子产品可靠性与环境试验编辑部

承办单位: 中国电子学会可靠性分会 广东省电子学会

2009 年 5 月