

文章编号: 1002-2082(2008)04-0533-04

大功率发光二极管可靠性和寿命评价试验方法

贺卫利, 郭伟玲, 高伟, 史辰, 陈曦, 吴娟, 陈建新

(北京工业大学 电控学院光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 介绍了发光二极管(LED)的发展简史。提出可能影响LED可靠性的几种因素,主要有封装中的散热问题和LED本身材料缺陷。对于LED可靠性,主要方法是通过测试其寿命来分析其可靠性,一般采取加速实验的方法来测试推导LED寿命。介绍了根据加速应力(主要分为单一加速应力和复合加速应力2种)评价LED寿命的测试方法。在不同加速试验应力条件下测试了大功率LED可靠性,并建立了LED寿命的几种数学模型。最后根据具体实例,通过选择加速应力和试验方法,给出具体推导LED寿命的数学公式。

关键词: 发光二极管; 寿命评价试验方法; 加速应力; 数学模型

中图分类号: TN384

文献标志码: A

Test method of life-time and reliability evaluation for high-power LED

HE Wei-li, GUO Wei-ling, GAO Wei, SHI Chen, CHEN Xi, WU Juan, CHEN Jian-xin

(Optoelectronic Technology Lab, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The development history of the light-emitting diode (LED) is introduced. Several factors influencing LED reliability are put forward, among which the material defectiveness of LED and the heat dissipation during packaging are the main factors. The reliability evaluation of LED is analyzed by testing the LED lifetime, which is usually derived from the accelerated test. The testing methods to evaluate LED lifetime according to the accelerated stress (single and composite accelerated stresses) are listed and introduced. The reliability of high-power LEDs was tested and several mathematical models of the LED lifetime were derived under different accelerated stresses. The mathematical formula for deriving the LED lifetime is given based on some examples.

Key words: light-emitting diode (LED); testing method of lifetime evaluation; accelerated stress; mathematical model

引言

自1968年利用氮掺杂工艺使GaAsP红色发光二极管(LED)的发光效率达到1 lm/W以来,LED的研究得到迅速发展。1985年,采用液相外延法,使得AlGaAs LED的发光强度首次突破1 cd^[1]。20世纪90年代初对于InGaAlP四元系材料的研究,

不仅大大提高了LED的效率,还将高亮度LED的光谱从红光扩展到黄光和黄绿光^[2-4]。20世纪90年代中期,Nakamura等人^[5-6]采用MOCVD方法成功制备出高亮度InGaN/AlGaN双异质结蓝光LED和InGaN量子阱结构紫外LED。GaN基蓝光LED的出现及其效率的迅速提高,使LED得以形

收稿日期:2007-05-22; 修回日期:2007-09-18

资助项目:北京市教委项目(10200650)

作者简介:贺卫利(1981—),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事大功率白光LED的寿命测试以及可靠性的研究。

E-mail: hwl007@emails.bjut.edu.cn

成三基色完备的发光体系,并使白光LED的研制成为可能。实现白光LED的技术途径主要有2条:一是采用红、绿、蓝三基色混合生成白光;二是通过荧光粉转换的方法实现白光,目前以后者居多^[7-11]。功率型白光LED是半导体照明的核心,研究开发高效大功率白光LED外延、芯片及封装技术是业界永恒的主题。目前大功率LED在可靠性方面还有不足之处,关于大功率发光二极管的寿命测试方法和数据报道也仍显不足。以此可以看出,大功率LED的可靠性研究尤其是寿命评价测试具有非常重要的意义。

1 影响LED可靠性的因素

1.1 封装中的散热问题

封装过程中的散热是必须解决的一个重要问题。早期的GaN基LED可靠性研究观察到光输出迅速降低的一个重要原因是由于蓝光与紫外线辐射的温度升高,导致封装材料的透明度下降。长时间接受紫外线的辐射会降低许多聚合物的光学透明度,而GaN带间辐射复合会产生紫外线,所以认为紫外辐射引起封装材料退化是合理的。

对于封装材料的热退化,有试验研究表明:塑料在150℃左右会由于单纯的热效应使LED的光输出减弱,尽管在寿命试验中没有发现塑料封装的外观呈褐色,但与LED接触的部分可能发生了变化。进一步研究发现,环境温度为95℃,驱动电流 ≥ 40 mA时,结温超过了145℃,非常接近塑料变色的温度;当驱动电流小于30 mA时,结温小于135℃,与之对应的LED退化率也很小,所以引起塑料封装材料变化,对LED寿命有重要影响的温度范围是135℃~145℃;另外,在大电流条件下,封装材料甚至会碳化,在器件表面生成不透明物质,或者碳化物质在表面形成电导通道,导致器件失效。由于小功率GaN基LED的正常工作电流是20 mA,远小于试验电流,封装材料碳化这种比较极端的失效方式只可能出现在加速寿命试验中,在正常工作时,封装材料应该是缓慢退化的。

1.2 LED材料中的缺陷

LED材料中的缺陷会引起器件光输出的衰减,半导体薄膜材料中的晶格缺陷包括点缺陷、线缺陷和面缺陷。由于缺陷对载流子具有较强的俘获作用,在发光二极管制备过程中引入缺陷将在有源层中形成无辐射复合中心,增加了光吸收,使得器件发光效率降低。而注入载流子的无辐射复合又会

使能量转化为晶格振动,导致了缺陷的运动和增殖^[11-12]。

1.3 其他因素

静电导致器件灾变性失效;电极性能不稳定导致器件灾变性失效;荧光粉引起白光LED光输出衰减等,这些都可以影响LED的寿命和性能。

2 实验方法和理论模型

2.1 加速试验的意义及分类

所谓加速试验是在比规定使用条件(正常条件)更短的时间内确保获得所需可靠信息的试验。那些通过加强试验应力使试验加速的试验称为强化试验。寿命试验是可靠性试验的主要项目,对于大多数机电产品,其寿命试验只能进行加速试验,以节省费用和缩短产品开发周期。

按试验应力的施加方式(时间特性),加速试验分为3种:1)恒定应力加速试验。在试验全过程中保持试验应力不变,程序简单,应用广。2)步进应力加速试验,也称阶梯应力加速试验。在试验过程中,试验应力呈阶梯状上升,直至发生破坏。应力升距和时间步长的变化,可构成不同试验方案。3)序进应力加速试验。试验应力随时间连续递增,可获得很大加速性,但操作复杂,应用少^[13-14]。

2.2 设计加速试验的原则

2.2.1 明确失效定义

对于突变失效,容易区别正常状态与失效状态。而对于由于性能退化和参数漂移引起的渐变失效,则必须明确失效判据或极限状态的定义。这种失效定义可以是针对整个产品的,也可以是针对决定产品寿命的关键零部件的,视产品特点而定。

2.2.2 明确加速应力

产品的可靠性和耐久性受其整个寿命剖面中各种因素的影响,包括载荷、环境、工作方式等。应列举出所有能在使用(或储存)条件下导致失效或使工作能力退化的因素。根据失效定义及失效机理,明确寿命耗损的主导过程,确定对产品或其关键零部件工作能力影响显著的那些因素,并从中选定一个或数个进行强化,即使其在加速试验中的水平高于正常状态的水平。这些强化作用因素称为加速因素或加速应力。选择加速应力除考虑加速性即在加速失效意义上的强化有效性外,还应考虑实践上的可行性,即改变应力水平的技术可能性。

2.2.3 明确强化极限

在选定加速应力即强化因素之后,还要确定强

化水平。从加速失效及损伤累积过程上看,应力水平越高越有效,但应力不能随意提高。在很多情况下存在强化极限,应力水平超过此极限将导致失效机理的改变,加速试验将失去意义。为了使加速试验具有相似性,必须保证试验中失效机理守恒。因此,应遵守如下原则:加速应力水平<强化极限。

标志试验方案加速性的参数是加速系数,其定义是,基准应力条件的试验与某种应力条件下的加速试验达到相等的累积失效概率所需的时间之比。设 A_L 为寿命 L 的加速系数, L_i 为基准(正常)应力下的寿命, L_o 为加速应力下的寿命,则

$$A_L = L_i / L_o \quad (1)$$

2.3 单一应力加速试验

该试验只有一种加速应力,加速应力与产品寿命的理论关系由加速试验数学模型描述。

2.3.1 阿伦纽斯模型

此模型广泛应用于产品寿命为温度函数的情况,即加速应力只有温度,产品的失效是由于化学反应或金属扩散而导致退化的。半导体与微电子器件,电绝缘与电介质材料、电池、塑料以及金属材料(蠕变)等都可采用温度加速试验。阿伦纽斯提出的寿命模型为

$$L(T) = A' \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (2)$$

式中: $L(T)$ 为产品在温度 T 下的寿命; T 为产品的工作温度(热力学温度); A' 和 B 为与材料性质有关的常数。对(2)式取对数得到直线加速方程:

$$\ln L(T) = A + B\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

这表明在 $\ln L - (1/T)$ 图上模型呈直线关系,用作图法可求得 A (截距)和 B (斜率),由加速直线外推到正常温度 $(1/T_N)$,从而得到 $\ln L(T_N)$ 。加速系数可表示为

$$A_L = L(T_i) / L(T) = \exp\left[-B\Delta\left(\frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

式中: T_i 和 T 分别为正常温度与加速温度(K);且有:

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} \quad (5)$$

2.3.2 阿伦纽斯-指数模型

由于很多产品的寿命在温度 T 时服从指数分布,则寿命 $L = \text{MTTF} = \theta(T)$,由(3)式可得阿伦纽斯-指数模型为

$$\ln[\theta(T)] = A + B\left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

表示为故障率与温度的关系:

$$\ln[\lambda(T)] = -A - B\left(\frac{1}{T}\right) \quad (7)$$

电子元器件常用故障率作为可靠性指标。

2.3.3 阿伦纽斯-对数正态模型

在温度 T 下某些产品的特性如电动机绝缘、某些半导体与固体器件等的寿命以及金属疲劳寿命都服从对数正态分布,这时采用中位寿命 $t_{0.5}$ 作为可靠性指标,于是相应的阿伦纽斯-对数正态模型为

$$\ln[t_{0.5}(T)] = A + B\left(\frac{1}{T}\right) \quad (8)$$

2.3.4 阿伦纽斯-威布尔模型

当在温度 T 下产品(如电容器介质、绝缘带等)寿命服从威布尔分布时,采用特征寿命 η 作为可靠性指标,相应的加速模型为

$$\ln[\eta(T)] = A + B\left(\frac{1}{T}\right) \quad (9)$$

2.4 复合应力加速试验

艾伦模型描述产品在温度应力 T 及非温度应力 S 的复合作用下,寿命与应力的关系为

$$L = AS^{-a} \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (10)$$

线性模型为

$$\ln L = A + B\left(\frac{1}{T}\right) - a \ln S \quad (11)$$

加速系数为

$$A_L = \left(\frac{S}{S_N}\right)^a \exp\left[-B\Delta\left(\frac{1}{T}\right)\right] \quad (12)$$

艾伦模型可用于在温度环境下机械零件的疲劳破坏、绝缘材料的耐电压破坏、半导体器件的通电腐蚀等加速试验。

3 大功率LED加速寿命试验的方法和选择

3.1 1 W级白光LED温度加速寿命试验

估计其寿命大约在10万h,我们分别取出3组二极管作为实验样品,温度分别调为70℃,80℃和90℃,根据以温度为应力的加速寿命试验外推器件的寿命时常采用(2)式阿伦纽斯方程的等价公式^[15-16]:

$$t = ce^{Ea/KT} \quad (13)$$

式中: c 为常数,与材料有关; Ea 为考虑失效机理的激活能; K 为彼耳兹曼常数($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$); T 为绝对温度; e 为自然常数。由(13)式可以推出:

$$t = t_0 e^{-\frac{Ea}{K}\left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right]} \quad (14)$$

式中: t_0 和 t 分别是LED在正常使用中的平均寿

命和在加速条件下的平均寿命; T_0 和 T 分别为正常使用中的温度和加速条件下的温度。据此,由 3 组数据计算出激活能 E_a 后,即可由 LED 在任何一个 T 温度下的寿命外推出 LED 在常温下的寿命。

3.2 1 W 级白光 LED 电流加速寿命试验

LED 寿命和电流的关系式^[15-16]为

$$t = t_0 \left(\frac{I}{I_0} \right)^{-n} \quad (15)$$

式中: t_0 为给定电流 I_0 下的寿命; t 为增加或降低后操作电流 I 下的寿命; n 为经验常数。

与电流加速一样,也要分别取 3 组二极管作 3 组加速实验,取定经验常数 n 后,由电流 I_0 下的 LED 寿命,即可推出该 LED 在电流 I 下的寿命。

4 总结

采用单一应力加速寿命试验和复合应力加速寿命试验同时对几组不同的 LED 进行加速老化试验,并通过一定的老化时间间隔地对其参数进行测量,当 LED 的参数基本下降到 50% 时,一般就认为已失效。通过上述几种老化模型推算出其寿命,分析其失效机理,达到测量可靠性的目的。

随着大功率 LED 的市场需求和发展前景,对其可靠性的研究越来越重要,尤其是其寿命测试尤为重要。我们可以从上述几点出发,具体研究和改善大功率 LED 的寿命,以增强其满足现实需求。

参考文献:

- [1] NISHIZAWA J, ITOH K, OKUNO Y, et al. LPE AlGaAs and red LED (candela class)[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 57(2): 210-214.
- [2] HUANG K H, YU J G, KUO C P, et al. Twofold efficiency improvement in high performance Al GaInP light-emitting diodes in the (555~620) nm spectral region using a thick GaP window layer[J]. Applied Physics Letters, 1992, 61(9): 1045-1047.
- [3] SUGAWARA H, ITAYA K, NOZAKI H, et al. High-brightness InGaAlP green light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 1992, 61(15): 1775-1777.
- [4] KISH F A, STERANKA F M, DEFEVERE D C, et al. Very high-efficiency semiconductor wafer-bonded trans-parent-substrate (Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/GaP light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(21): 839-841.
- [5] NAKAMURA S, MUKAI T, SENOH M. Candela-class high brightness InGaN/ AlGaIn double-hetero

structure blue-light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(13): 687-689.

- [6] NAKAMURA S, SENOH M, IWASA N, et al. High-power InGaN single-quantum-well-structure blue and violet light emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(13): 1868-1870.
- [7] SCHLOTTER P, SCHMIDT R, SCHNEIDER J. Luminescence conversion of blue light-emitting diodes [J]. Applied Physics: A, 1997, 64(4): 417-418.
- [8] FUMITOMO H, PETER K. White light from InGaN/conjugated polymer hybrid light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(20): 664-666.
- [9] PARK J K, LIM M A, KIM C H, et al. White light-emitting diodes of GaN-based Sr₂SiO₄:Eu and the luminescent properties [J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(5): 683-685.
- [10] 蒋大鹏, 赵成久, 侯凤勤, 等. 白光发光二极管的制备技术及主要特征 [J]. 发光学报, 2003, 24(4): 385-390.
JIANG Da-peng, ZHAO Cheng-jiu, HOU Feng-qin, et al. Fabrication and characteristics of white light-emitting diode [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2003, 24(4): 385-390. (in Chinese)
- [11] 陈贵楚, 范广涵, 陈练辉, 等. 掺杂与 Al 组分对 AlGaInP 四元系 LED 发光效率的影响 [J]. 光子学报, 2004, 33(3): 310-313.
CHEN Gui-chu, FAN Guang-han, CHEN Lian-hui, et al. Effect of p-doping density and Al composition upon luminescent efficiency [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(3): 310-313. (in Chinese)
- [12] 赵楚军, 李宏建, 崔昊杨, 等. 电场对单层有机电致发光二极管复合发光的影响 [J]. 应用光学, 2005, 26(2): 47-50.
ZHAO Chu-jun, LI Hong-jian, CUI Hao-yang, et al. Influence of electric field on recombination luminescence of single layer organic electroluminescent diode [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(2): 47-50. (in Chinese)
- [13] 陈志忠, 秦志新, 胡晓东, 等. 大功率白光 LED 的制备和表征 [J]. 液晶与显示, 2004, 19(2): 83-86.
CHEN Zhi-zhong, QIN Zhi-xin, HU Xiao-dong, et al. Fabrication and characterization of high-power white LED [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2004, 19(2): 83-86. (in Chinese)