

# 基于光-电-热-寿命理论的 LED 寿命预测模型

钱敏华 林燕丹 孙耀杰

(复旦大学信息科学与工程学院光源与照明工程系, 上海 200433)

**摘要** LED 的输出光通量、输入电功率、结温以及寿命之间互相影响、紧密联系。在设计、使用 LED 时需要综合考虑各个参数才能使 LED 工作在最佳状态。针对 LED 提出了光-电-热-寿命理论, 该理论揭示了 LED 的输出光通量、输入电功率、结温以及寿命这 4 个参数之间的内在联系。使用该理论可以建立 LED 寿命预测模型, 找到 LED 的输出光通量和寿命之间的关系式, 根据该关系式可以预测 LED 的寿命, 评估 LED 的可靠性。由此可以找到合适的 LED 工作点, 兼顾 LED 输出光通量和 LED 寿命, 实现 LED 在全生命周期内输出光通量最大, 从而达到优化 LED 工作状态的目的。

**关键词** 光电子学; 光-电-热-寿命理论; 寿命预测; LED

**中图分类号** O432 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0823001

## Life Prediction Model for LEDs Based on the Photo-Electro-Thermal-Life Theory

Qian Minhua Lin Yandan Sun Yaojie

(Department of Illuminating Engineering and Light Sources, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** The photometric, electrical, thermal and life features of LEDs are highly dependent on each other. All these factors should be considered together in order to optimize the operating point of LEDs. A photo-electro-thermal-life theory about LEDs is presented. This theory shows the inner links among photometric, electrical, thermal and life features of a LED. Using this theory, one can build a life prediction model and find out the relationship between output luminous flux and lifetime of LED. Based on this relationship, one can predict the lifetime of a LED and find the proper operating point, at which the LED will generate the maximum amount of luminous flux in its total life cycle.

**Key words** optoelectronics; photo-electro-thermal-life theory; life prediction; LED

**OCIS codes** 230.0250; 230.2090

## 1 引 言

由于具有节能、寿命长等优点, LED 已经成为最具前景的新型固体光源<sup>[1]</sup>。但是目前 LED 的应用主要集中在屏幕显示、交通信号灯和手机背光源等领域<sup>[2]</sup>, 对于需要大功率照明的场合, LED 的应用还受到诸多限制。这主要是因为提高 LED 的功率会导致 LED 结温升高, 而 LED 的结温升高又会

导致输出光通量的降低<sup>[3]</sup>。LED 输出光通量的降低也就意味着 LED 有效寿命的缩短。研究表明, LED 的寿命会随着结温的升高而呈指数下降<sup>[4]</sup>。文献[5]的研究表明结温从 40 °C 升高到 50 °C 会使得 LED 寿命从 42000 h 缩短到 18000 h。

LED 的结温会随着输入电功率的增加而升高, LED 的输出光通量会随着结温的升高而降低, 而

**收稿日期**: 2012-01-17; **收到修改稿日期**: 2012-03-12

**基金项目**: 国家 863 计划(2011AA03A113)和上海科委(09DZ1141004)资助课题。

**作者简介**: 钱敏华(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光、电、热多场融合等方面的研究。

E-mail: 09210720086@fudan.edu.cn

**导师简介**: 孙耀杰(1969—), 男, 副教授, 主要从事光伏发电、智能照明与 LED 驱动技术等方面的研究。

E-mail: yjsun@fudan.edu.cn(通信联系人)

LED 的寿命又会随着结温的升高而缩短<sup>[6,7]</sup>,所以说 LED 受光、电、热、寿命等参数的综合影响。文献[8]讨论了 LED 输出光通量和结温两者之间的关系;文献[9]进一步研究了 LED 输出光通量、结温以及输入电功率三者之间的关系,并得出了光-电-热理论,该理论将 LED 的光、电、热这 3 个参数相结合,从而找到了使得 LED 输出光通量最大的输入电功率。但是文献[8,9]的讨论均未涉及 LED 的寿命,而 LED 的寿命又是评价 LED 性能的重要参数。因此在研究 LED 时,有必要引入寿命,综合考虑光、电、热、寿命这 4 个参数。目前对于 LED 寿命的研究集中在通过建立加速应力模型<sup>[10]</sup>对 LED 进行加速寿命试验<sup>[11,12]</sup>,从而得到 LED 寿命和结温的关系。但是在设计 LED 时,往往希望知道当 LED 的输出光通量为某一定值时,LED 的寿命为多长,或者是希望 LED 的寿命能达到某值时,LED 的输出光通量应该为多大。这就要求能够找到 LED 的输出光通量和寿命的直接对应关系。

本文找到了 LED 的输出光通量、输入电功率、结温以及寿命这 4 个参数之间的关系,提出了光-电-热-寿命理论,并且使用该理论建立了 LED 寿命预测模型,利用该模型得出 LED 输出光通量和寿命两者之间的对应关系,从而能够实现对 LED 寿命的快速、准确评估<sup>[6]</sup>。同时 LED 的设计者可以根据该寿命预测模型选择合适的 LED 工作点,使得 LED 在全生命周期内输出光通量达到最大,实现 LED 工作状态的优化。

## 2 光-电-热-寿命理论

### 2.1 LED 输入电功率和结温之间的关系

多个芯片布置在同一个散热器上时,各个芯片之间会有热耦合,同时各个芯片,即使是同一规格的,它们之间也会有差异,消耗的电功率也会不同,所以各个芯片的结温必然不同。为了简化分析,假设分布在同一散热器上的各个芯片完全无差异,也不考虑芯片之间的热耦合,所以各个芯片结温相同。于是可以得到如图 1 所示的热阻计算模型。

芯片 PN 结到环境之间的总热阻为

$$R_N = \frac{R_{jc}}{N} + R_{hs}, \quad (1)$$

式中  $R_{jc}$  为单个 LED 芯片 PN 结到芯片外壳的热阻, $N$  为 LED 芯片的个数, $R_{hs}$  为散热器的热阻。

由热阻的定义<sup>[13]</sup>可得

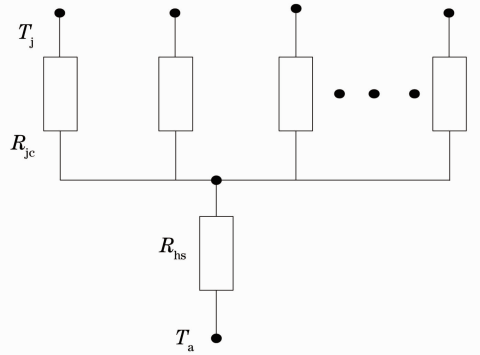


图 1 多芯片热阻模型

Fig. 1 Thermal resistance model of multiple chips

$$R_N = \frac{T_j - T_a}{P_N}, \quad (2)$$

式中  $T_j$  为 LED 芯片结温, $T_a$  为环境温度, $P_N$  为  $N$  个 LED 芯片总的发热量,

$$P_N = Nk_h P, \quad (3)$$

式中  $P$  为单个 LED 芯片的输入电功率, $k_h$  表示 LED 芯片的输入电功率中转换为热量的比例,其大小会随着输入电功率而变化,并且是一个小于 1 的常数。输入 LED 的电功率并不完全转化为热量,因此需要用  $k_h$  来衡量有多少电功率转化为了热量。

将(1)、(3)式代入(2)式得

$$\frac{R_{jc}}{N} + R_{hs} = \frac{T_j - T_a}{Nk_h P}, \quad (4)$$

整理得

$$T_j = T_a + (R_{jc} + NR_{hs})k_h P, \quad (5)$$

(5)式即为 LED 输入电功率和结温之间的关系。

在一定的温度范围内,随着结温的变化,芯片 PN 结到外壳的热阻  $R_{jc}$  和散热器的热阻  $R_{hs}$  的变化很小,因此可以假设  $R_{jc}$  和  $R_{hs}$  均为常数。则由(5)式可知 LED 的结温和输入电功率成正比,如图 2 所示。

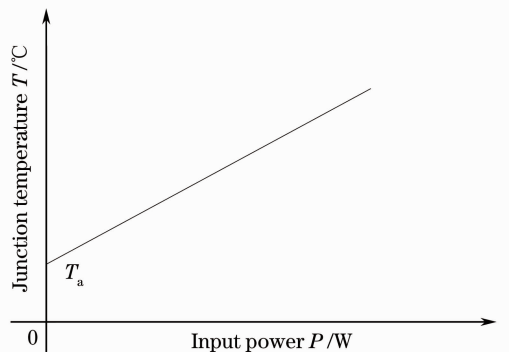


图 2 芯片结温和输入电功率的关系

Fig. 2 Relation between junction temperature and input power

## 2.2 芯片寿命和结温之间的关系

LED 的寿命通常被定义为输出光通量衰减到初始值的 70% 所经历的时间<sup>[5]</sup>。LED 的寿命会随着 LED 结温的升高而缩短。各个 LED 生产厂商都会在相关技术文档中以图表的形式给出 LED 寿命和结温的关系,如图 3 所示<sup>[14]</sup>。

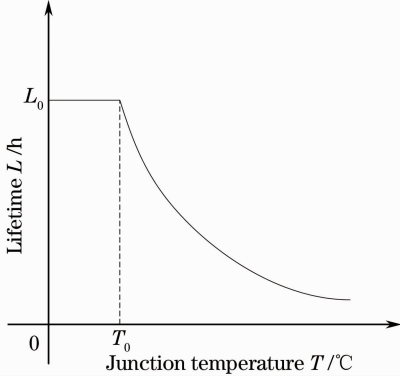


图 3 LED 寿命和结温的关系

Fig. 3 Relation between lifetime and junction temperature

从图 3 可以看出,当结温小于  $T_0$  时,LED 寿命为定值  $L_0$ ,与结温无关,因此不予讨论。以下讨论均为当 LED 结温  $T_j$  大于  $T_0$  时的情况。

用指数衰减形式对图 3 中  $T_j > T_0$  部分进行拟合<sup>[11,15]</sup>可得

$$L = L_0 \exp[k_L(T_j - T_0)], \quad (6)$$

式中  $L$  为 LED 的寿命; $k_L$  为与 LED 本身相关的常数,并且为负值,该值表示 LED 寿命衰减的快慢程度。(6)式即为 LED 寿命和结温的关系式,当  $T_j > T_0$  时,LED 寿命随着结温的升高而呈指数下降。

## 2.3 LED 输出光通量和输入电功率之间的关系

文献[9]讨论了 LED 输出光通量、输入电功率和结温之间的关系,并且得出了如图 4 所示的 LED 输入电功率和输出光通量之间的关系。

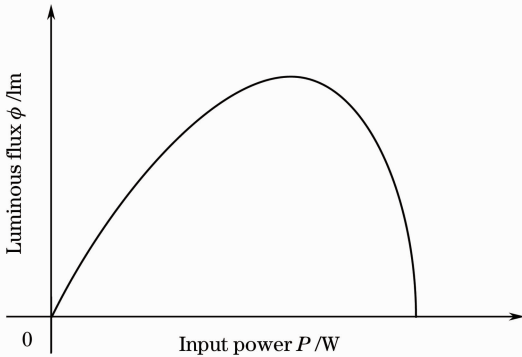


图 4 输入电功率和输出光通量的关系

Fig. 4 Relation between input power and output luminous flux

$$\phi_N = NE_0 \{ [1 + k_e(T_a - T_0)]P + k_e k_h (R_{jc} + NR_{hs})P^2 \}, \quad (7)$$

式中  $\phi_N$  为  $N$  个 LED 输出的总光通量; $E_0$  表示在特定结温  $T_0$  下 LED 的光效; $k_e$  为一个表示光效降低快慢程度的系数,为一负值。LED 的光效随着结温的升高而下降,并且是线性关系<sup>[16]</sup>。

对(7)式关于输入电功率  $P$  求导,并且令导数等于 0,可以求得最大输出光通量为

$$\phi_N^* = - \frac{NE_0 [1 - k_e(T_0 - T_a)]^2}{4k_h k_e (R_{jc} + NR_{hs})}. \quad (8)$$

(5)式揭示了 LED 输入电功率和结温之间的关系;(6)式揭示了 LED 寿命和结温的关系;(7)式揭示了 LED 输出光通量和输入电功率之间的关系。这三个公式揭示了 LED 光、电、热、寿命四者之间的相互关系,即 LED 光-电-热-寿命理论。

## 2.4 LED 寿命预测模型推导

将(5)式代入(7)式得

$$\phi_v = NE_0 \left\{ [1 + k_e(T_a - T_0)] \frac{T_j - T_a}{(R_{jc} + NR_{hs})k_h} + k_e k_h (R_{jc} + NR_{hs}) \left[ \frac{T_j - T_a}{(R_{jc} + NR_{hs})k_h} \right]^2 \right\}. \quad (9)$$

将(6)式代入(9)式得

$$\phi_v = \frac{NE_0}{k_h (R_{jc} + NR_{hs})} \left\{ \frac{k_e}{k_L^2} \left[ \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \right]^2 + \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) + (T_0 - T_a) \right\}, \quad (10)$$

(10)式即为利用光-电-热-寿命理论得到的 LED 寿命预测模型。

在该模型中,除了  $\phi_N$  和  $L$  外,其余参数均为已知数。因此针对某一款 LED,就可以得到其输出光通量和寿命之间的直接对应关系。进而可以通过测量 LED 输出光通量来预测其寿命,或者通过调整 LED 输出光通量,使得 LED 的寿命符合要求。

## 3 LED 优化工作状态的求解

在实际使用 LED 时,希望 LED 既能输出最大的光通量,又能维持最长的寿命。但是根据图 5 可知,LED 的输出光通量和寿命不可能同时取到最大值<sup>[17]</sup>。因此,在实际使用 LED 时需要寻找两者之间的平衡点。而利用 2.4 节所推导的 LED 寿命预测模型,就可以找到这个平衡点,使得 LED 工作在该点时,输出光通量和寿命的乘积最大(图 5 中  $\phi \times L$  最大),即 LED 在全生命周期内的输出光通量达到最大值。该平衡点可以通过将  $\phi \times L$  对  $L$  求导得到:

$$\phi \times L = \frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} \left\{ \frac{k_e}{k_L^2} \left[ \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \right]^2 + \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) + (T_0 - T_a) \right\} L, \quad (11)$$

$$\frac{d(\phi \times L)}{dL} = \frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} \left\{ \frac{k_e}{k_L^2} \left[ \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \right]^2 + \left[ 2 \frac{k_e}{k_L} + \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} \right] \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) + \left[ \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} + T_0 - T_a \right] \right\}. \quad (12)$$

令  $\frac{d(\phi \times L)}{dL} = 0$ , 得

$$\frac{k_e}{k_L^2} \left[ \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \right]^2 + \left[ 2 \frac{k_e}{k_L} + \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} \right] \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) + \left[ \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} + T_0 - T_a \right] = 0. \quad (13)$$

求解(13)式得

$$L_1 = L_0 \exp(A_1), \quad (14)$$

$$L_2 = L_0 \exp(A_2), \quad (15)$$

式中

$$A_1 = \left\{ - \left[ \frac{2k_e}{k_L} + k_e(T_0 - T_a) + 1 \right] + \sqrt{\left( \frac{2k_e}{k_L} \right)^2 + [k_e(T_0 - T_a) - 1]^2} \right\} \frac{k_L}{2k_e}, \quad (16)$$

$$A_2 = \left\{ - \left[ 2 \frac{k_e}{k_L} + k_e(T_0 - T_a) + 1 \right] - \sqrt{\left( 2 \frac{k_e}{k_L} \right)^2 + [k_e(T_0 - T_a) - 1]^2} \right\} \frac{k_L}{2k_e}. \quad (17)$$

可见,(11)式具有两个极值点  $L_1, L_2$ , 需要通过对(11)式关于  $L$  求二阶导数来确定哪个是极大值点。

$$\frac{d(\phi \times L)}{dL^2} = \frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} \left\{ 2 \frac{k_e}{k_L^2} \frac{1}{L} \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) + \left[ \frac{2k_e}{k_L^2} + \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} \right] \frac{1}{L} \right\}. \quad (18)$$

将(14)式代入(18)式得

$$\frac{d(\phi \times L)}{dL^2} = \left\{ \frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} \frac{1}{L_0 \exp(A_1)} \frac{1}{k_L} \sqrt{\left( \frac{2k_e}{k_L} \right)^2 + [k_e(T_0 - T_a) - 1]^2} \right\}. \quad (19)$$

因为  $\frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} > 0, \frac{1}{L_0 \exp(A_1)} > 0, \sqrt{\left( 2 \frac{k_e}{k_L} \right)^2 + [k_e(T_0 - T_a) - 1]^2} > 0$  且  $k_L < 0$ , 所以  $\frac{d^2(\phi \times L)}{dL^2} < 0$ , 因此  $L_1 = L_0 \exp(A_1)$  为(11)式的极大值点。

同理将(15)式代入(18)式得

$$\frac{d(\phi \times L)}{dL^2} = \left\{ - \frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} \frac{1}{L_0 \exp(A_2)} \frac{1}{k_L} \sqrt{\left( 2 \frac{k_e}{k_L} \right)^2 + [k_e(T_0 - T_a) - 1]^2} \right\}. \quad (20)$$

因为  $\frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} > 0, \frac{1}{L_0 \exp(A_2)} > 0, \sqrt{\left( 2 \frac{k_e}{k_L} \right)^2 + [k_e(T_0 - T_a) - 1]^2} > 0$  且  $k_L < 0$ , 所以  $\frac{d^2(\phi \times L)}{dL^2} > 0$ , 因此  $L_2 = L_0 \exp(A_2)$  为(11)式的极小值点。

将  $L = L_1 = L_0 \exp(A_1)$  代入(10)式 LED 寿命预测模型, 得到对应的输出光通量为

$$\phi_1 = \frac{NE_0}{k_h(R_{jc} + NR_{hs})} \left[ \frac{k_e}{k_L^2} A_1^2 + \frac{k_e(T_0 - T_a) + 1}{k_L} A_1 + T_0 - T_a \right]. \quad (21)$$

综上所述, 当 LED 的工作点为  $(\phi_1, L_1)$ , 即 LED 输出光通量为  $\phi_1$ , LED 寿命为  $L_1$  时, LED 在全生命周期内输出的光通量最大, 即  $\phi_1 \times L_1$  取得最大值。该工作点即为 LED 输出光通量和寿命的平衡点。

## 4 实验验证

文献[9]将 8 颗 LUXEON K2 白光 LED 安装

在热阻为  $6.3 \text{ }^\circ\text{C/W}$  的散热器上, 并且通过实验测得了如下参数:  $k_e = 0.005, k_h = 0.85, T_a = 28 \text{ }^\circ\text{C}, T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}, E_0 = 41 \text{ lm/W}, N = 8, R_{hs} = 6.3 \text{ }^\circ\text{C/W}, R_{jc} = 10 \text{ }^\circ\text{C/W}$ 。由于实验室环境和真实环境间存在差异, 且因为耗时太长和成本太高, 不可能对每个器件均进行寿命试验。因此国际电工委员会和 ISO 标准化组织对于同类电子元器件的失效和寿命的评估主要依据国际标准 SIEMENS 29500 Failure

Rates of Components, MIL-HDBK-217E Reliability Prediction of Electronic Equipment 和 Chinese Military Standard GJB/Z 299B 电子设备可靠性预计手册<sup>[18]</sup>, 对于同类器件依据失效机理相似的原则来进行寿命评估。对于 LED 器件可以采用 GJB/Z 299B 来进行寿命评估, 具体的操作方法按照 DIN IEC 62506 Methods for Product Accelerated Testing 来进行。本文采用的 LUXEON K2 LED 和 LUXEON Rebel LED, 其芯片材质相同, 均为 InGaN, 且制作工艺和测试环境等关键参数满足 DIN IEC 62506 和 GJB/z 299B 的等效条件, 因此, 根据同种材料失效机理相似的原则, 可以将 LUXEON Rebel LED 的寿命-结温曲线, 用于预测 LUXEON K2 LED 的寿命。用(6)式对文献[14]中给出的 LUXEON Rebel LED 的寿命-结温曲线进行拟合, 得到:  $L_0 = 60000$  h,  $k_L = -0.09$ 。

将上述参数  $k_c$ 、 $k_h$ 、 $T_a$ 、 $T_0$ 、 $E_0$ 、 $N$ 、 $R_{hs}$ 、 $R_{jc}$ 、 $L_0$ 、 $k_L$  代入(10)式得到 LUXEON K2 LED 的寿命预测模型得

$$\phi_v = -3.942 \times \left( \ln \frac{L}{60000} \right)^2 - 72.053 \times \ln \frac{L}{L_0} - 19.166. \quad (22)$$

代入(14)、(21)式得到, 使得 LED 在全生命周期内输出光通量最大的工作点  $(L_1, \phi_1)$  为

$$\begin{cases} L_1 = 17820 \text{ h} \\ \phi_1 = 62.49 \text{ lm} \end{cases} \quad (23)$$

根据(22)式绘制出 LUXEON K2 LED 的寿命和输出光通量关系曲线, 如图 5 所示。

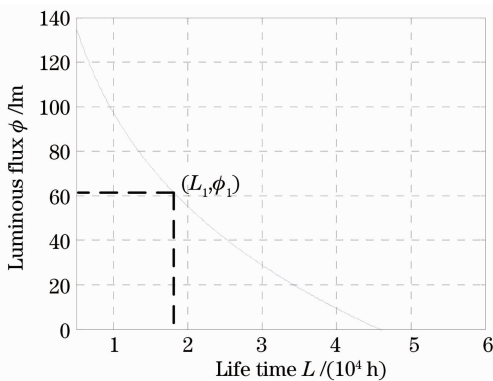


图 5 LED 输出光通量和寿命关系曲线

Fig. 5 Relation between life time and output luminous flux

LUXEON K2 LED 在文献[9]的工作条件下, 当其输出光通量达到 62.49 lm, 寿命为 17820 h 时, 在整个生命周期内输出光通量达到最大。

## 5 结 论

通过研究 LED 输出光通量、输入电功率、结温和寿命四者之间的内在联系, 得到了光-电-热-寿命理论。利用该理论建立了 LED 寿命预测模型, 找到了 LED 输出光通量和寿命之间的直接对应关系。该对应关系能够帮助 LED 设计者预测 LED 的寿命, 得到 LED 在任意输出光通量下的实际寿命, 进而找到合适的 LED 工作点, 使得 LED 在该点工作时输出光通量和寿命的乘积最大, 即 LED 在全生命周期内输出光通量最大。

## 参 考 文 献

- 1 M. R. Krames, O. B. Shchekin, R. Mueller-Mach *et al.*. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting[J]. *J. Display Technol.*, 2007, **3**(2): 160~175
- 2 G. Harbers, S. J. Bierhuizen, M. R. Krames. Performance of high power light emitting diodes in display illumination applications[J]. *J. Display Technol.*, 2007, **3**(2): 98~109
- 3 C. Qian. Thermal management of high-power white LED package[C]. 8th Int. Electron. Packaging Technol., 2007. 1~5
- 4 A. Christensen, M. Ha, S. Graham. Thermal management methods for compact high power LED arrays[C]. *SPIE*, 2007, **6669**: 66690Z
- 5 N. Narendran, Y. M. Gu. Life of LED-based white light sources[J]. *J. Display Technol.*, 2005, **1**(1): 167~171
- 6 IEEE. IEEE Standard Methodology for Reliability Prediction and Assessment for Electronic Systems and Equipment [S]. IEEE Standard 1413-1998. New York: IEEE, 1998
- 7 Miao Hongli, Zhou Xiaoguang, Zhou Changyou *et al.*. Study on empirical model in junction-temperature measurement of LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100313
- 8 苗洪利, 周晓光, 周长友等. 发光二极管结温测量的经验模型研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100313
- 9 C. Biber. LED light emission as a function of thermal conditions [C]. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2008. 180~184
- 10 S. Y. Hui, Y. X. Qin. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, **24**(8): 1967~1976
- 11 B. Foucher, J. Boullié, B. Meslet *et al.*. A review of reliability prediction methods for electronic devices[J]. *Microelectronics Reliability*, 2002, **42**(8): 1155~1162
- 12 J. B. Bowles. A survey of reliability-prediction procedures for microelectronic devices [J]. *IEEE Trans. Reliability*, 1992, **41**(1): 2~12
- 13 Yu Fei, Jin Lei. Mathematical model of aging and the life test method for GaN LED [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0806001
- 14 余菲, 金雷. GaN 发光二极管的老化数学模型及寿命测试方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0806001
- 15 Wu Haibin, Wang Changling. Experimental research on influence of packing materials of white LED on its luminous decay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1091~1094
- 16 吴海彬, 王昌铃. 白光 LED 封装材料对其光衰影响的实验研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1091~1094
- 17 LUXEON Rebel Reliability. Reliability Data RD07 [OL]. <http://www.philipslumileds.com/support/documentation/reliability-data>
- 18 L. Trevisanello, M. Meneghini, G. Mura *et al.*. Accelerated life test of high brightness light emitting diodes[J]. *IEEE Trans.*

- Device and Materials Reliability, 2008, **8**(2): 304~311
- 16 N. A. A. Karim, P. A. Narayana, K. N. Seetharamu. Thermal analysis of LED package [J]. *Microelectronics International*, 2006, **23**(1): 19~25
- 17 Wang Yanming, Xiong Chuanbing, Wang Guangxu *et al.*. Study on aging characterization of 1 W epitaxy on Si substrate blue LED based on different substrates [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1749~1754
- 汪延明, 熊传兵, 王光绪 等. 不同基板 1 W 硅衬底蓝光 LED 老化性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1749~1754
- 18 The General Reserve Department of PLA. GJB/Z 299B-98. Reliability Prediction Handbook for Electronic Equipment [S]. Beijing: Electronics Department, 1998
- 中国人民解放军总装备部. GJB/Z 299B-98. 电子设备可靠性预计手册[S]. 北京: 电子部, 1998

栏目编辑: 韩 峰