

## 基于反应动力学的 GaN LED 参数退化模型的研究\*

郭春生<sup>†</sup> 张燕峰 万宁 李睿 朱慧 冯士维

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2013年6月21日收到; 2013年7月17日收到修改稿)

加速实验中, 参数退化模型描述了参数的退化规律, 参数退化规律对应于器件退化机理, 而退化机理又对应于内部的物理化学反应. 因此, 本文基于反应动力学中物理化学反应的温度效应速率模型及反应量浓度随时间的变化规律, 研究并建立了 GaN LED 参数退化模型. 本模型尝试从物理机理上解释参数退化过程中的退化规律, 包括单调上升或单调下降退化规律、先上升后下降或先下降后上升等非单调退化规律, 解决了实验后拟合方法不能建立非单调退化模型的问题. 然后对 GaN LED 进行加速实验, 确定模型参数. 同时对 GaN LED 的退化规律进行分解, 并且量化了 GaN LED 两种退化规律的退化比例及时间常数.

**关键词:** 参数退化模型, 反应动力学, 加速实验, GaN LED

**PACS:** 85.60.Jb, 73.61.Ey, 05.20.Dd, 05.70.Ce

**DOI:** 10.7498/aps.62.218503

## 1 引言

GaN LED 器件由于其高效、节能、环保等方面的优点, 已经被广泛的应用于各领域<sup>[1-3]</sup>. 对于半导体器件, 在使用前需要评估其可靠性水平, 而发光二极管的可靠性评估一般是在加速寿命实验中检测其电学参数的变化<sup>[4]</sup>. 随着技术和工艺水平的不断发展, GaN LED 器件的可靠性逐渐提高. 加速寿命实验逐渐不能完全快速、准确评价高寿命和高可靠性 GaN LED 器件的可靠性水平. 为了缩短评价时间, 提高可靠性评价的准确性, 参数退化模型开始应用到器件的可靠性评价中<sup>[5,6]</sup>. 参数退化模型基于器件性能参数的变化, 通过分析、模拟参数动态退化数据的退化规律而建立, 然后利用早期退化数据, 外推长期参数退化数据, 从而对产品可靠性做出评定, 因此缩短了实验时间, 提高了效率. 并且由于参数退化模型注重退化过程及规律, 提高了评价的准确性.

目前, 国内外对器件的退化模型进行了大量的研究. Huang<sup>[7]</sup> 在参数退化模型的研究中采用先实

验后拟合的方法比较了线性模型与次线性模型, 得出激光器的阈值电流随老化时间的退化规律更符合次线性模型. 耿新明等<sup>[8]</sup> 在研究真空荧光显示屏 (VFD) 时采用最小二乘法拟合 VFD 退化数据, 从而估算出 VFD 在正常应力下的寿命. Wang 等<sup>[9]</sup> 在假设器件退化单一的前提下利用 ARHP 模型对 SLD 器件的退化数据进行拟合, 外推器件长期退化数据. Fan 等<sup>[10]</sup> 研究高功率白光 LED 的寿命时, 对退化数据进行非线性二次拟合, 发现了器件的退化量与时间呈指数关系, 评价器件的可靠性. Zhou 等<sup>[11]</sup> 研究了电解电容的退化过程, 通过回归分析, 得到了电解电容在 20 °C 下的反应速率随着时间呈指数形式单调增大的规律. Chen 等<sup>[12]</sup> 假设退化函数和应力呈指数关系, 利用 PDHM 退化模型研究器件的可靠性, 得到了退化模型与施加应力呈指数关系. 邓爱明等<sup>[13]</sup> 对参数退化模型进行进一步研究时指出, 器件的退化模型的研究通常是建立在退化轨迹曲线为线性的, 且退化量分布的标准方差为常数假设的基础上, 因此利用拟合方法得到的退化模型仅对恒定应力水平下的产品单调退化有效.

\* 国家自然科学基金(批准号: 61204081)、广东省产学研项目(批准号: 2011B090400262)和广东省重大科技专项项目(批准号: 2012A080304003, 2011A080801005)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: guocs@bjut.edu.cn

以上文献中, 均对器件的参数退化规律进行了深入而有意义的探索, 主要采用先实验, 后拟合的方法对器件的参数退化规律进行研究, 尝试拟合得到器件的参数退化模型, 以外推器件长期退化规律, 快速评价器件的可靠性. 然而, 目前国内外文献中没有见到对参数退化规律的物理机理解释, 并且现有的参数退化模型只能模拟单调退化规律, 对于先上升后下降或先下降后上升等非单调退化规律, 先实验, 后拟合的方法并不适用. 针对该问题, 本文基于反应动力学中物理化学反应的温度效应速率模型及反应量浓度随时间的变化规律, 建立参数退化模型. 尝试从物理机理上解释参数退化过程中的退化规律, 包括单调上升或单调下降退化规律、先上升后下降或先下降后上升等非单调退化规律, 解决了实验后拟合方法不能建立非单调退化模型的问题.

## 2 理论模型

参数退化模型描述了器件在退化过程中的退化量与反应时间的关系, 本文根据反应动力学中物理化学反应的温度效应速率模型及反应量的浓度变化规律, 建立参数退化模型. 反应动力学中物理化学反应的温度效应速率模型及反应量的浓度变化规律由均相反应动力学方程描述, 均相反应动力学方程为

$$r = \sum_i v_i(T) f_i(c), \quad (1)$$

式中,  $r$  为均相反应速率,  $i$  为半导体器件的反应个数,  $T$  为实验温度,  $c$  为反应物的浓度,  $v_i(T)$  为反应速率的温度效应关系式,  $f_i(c)$  为反应速率的浓度效应关系式.

反应速率的温度效应关系式  $v_i(T)$  常用 Arrhenius 方程表示, 描述了化学反应过程中反应速率和反应温度的关系. 其表达式为

$$v_i(T) = A_i e^{-\frac{E_{Ai}}{k_B T}}, \quad (2)$$

其中  $E_{Ai}$  为激活能,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $A_i$  为与温度无关的常数,  $T$  为实验温度.

反应速率的浓度效应关系式  $f_i(c)$  常用幂级数的形式表示, 描述了化学反应过程中反应速率和反应物浓度的关系. 其表达式为

$$f_i(c) = c_1^\alpha c_2^\beta, \quad (3)$$

$c_1^\alpha c_2^\beta$ , 分别为第  $i$  个反应中两种反应物的物质的量浓度,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为两种反应物的反应级数, 反应级数表示反应速率对反应物的敏感程度.

当反应级数为一级的不可逆反应时, 反应速率的浓度效应关系式  $f_i(c)$  简化为

$$f_i(c) = \frac{c_i}{\tau_i}, \quad (4)$$

$c_i$  为反应物的物质的量浓度,  $\tau_i$  为反应物的反应时间常数.

在反应体系中, 反应速率的浓度效应关系式  $f_i(c)$  可由单位时间单位反应体积内反应物的变化量表示, 因此

$$f_i(c) = -\frac{1}{V} \frac{dn_i}{dt} [\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})], \quad (5)$$

$n_i$  为反应物的物质的量,  $V$  为反应过程中系统的体积,  $t$  为反应时间.

反应过程中系统体积发生的变化可以忽略, 因此 (5) 式可改写为

$$f_i(c) = -\frac{dc_i}{dt}. \quad (6)$$

将 (4) 式代入 (6) 式, 分离变量

$$\frac{dt}{\tau_i} = -\frac{dc_i}{c_i}, \quad (7)$$

由初始条件  $t = 0, c_i = c_{0i}$ , 对 (7) 式进行积分

$$\frac{1}{\tau_i} \int_0^t dt = -\int_{c_{0i}}^{c_i} \frac{dc_i}{c_i}, \quad (8)$$

整理, 得

$$\frac{t}{\tau_i} = \ln c_{0i} - \ln c_i = \ln \left( \frac{c_{0i}}{c_i} \right). \quad (9)$$

两边同时进行指数变换

$$c_i = c_{0i} \cdot e^{-t/\tau_i}, \quad (10)$$

因此, 反应速率的浓度效应关系式  $f_i(c)$  可以写为

$$f_i(c) = \frac{c_{0i}}{\tau_i} \cdot e^{-t/\tau_i}, \quad (11)$$

其中  $\tau_i$  为反应物的反应时间常数,  $c_{0i}$  为反应物的初始物质的量浓度, 即在  $t = 0$  时的物质的量浓度.

半导体器件在退化过程中, 均相反应速率  $r$  可以表示为

$$r = \sum_i A_i e^{-\frac{E_{Ai}}{k_B T}} \cdot \frac{c_{0i}}{\tau_i} \cdot e^{-t/\tau_i}, \quad (12)$$

其中,  $i$  为半导体器件的反应个数,  $A_i$  为与温度无关的常数,  $E_{Ai}$  为激活能,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为实验温度;  $\tau_i$  为反应物的反应时间常数,  $c_{0i}$  为反应物的初始物质的量浓度, 即在  $t = 0$  时的物质的量浓度.

半导体器件的失效敏感参数退化量为退化速率对时间的积分, 即均相反应速率对时间的积分, 因此, 参数退化模型的形式为

$$\Delta M = \sum_i N_i e^{-t/\tau_i}, \quad (13)$$

其中,  $\Delta M$  为半导体器件的失效敏感参数退化量,  $i$  为半导体器件的反应个数,  $N_i$  为半导体器件在退化过程中的退化比例,  $N_i = A_i e^{-\frac{E_{Ai}}{k_B T}} \cdot c_{0i}$ ,  $A_i$  为与温度无关的常数,  $E_{Ai}$  为激活能,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为实验温度,  $c_{0i}$  为反应物的初始物质的量浓度, 即在  $t = 0$  时的物质的量浓度,  $\tau_i$  为反应物的反应时间常数,  $t$  为实验时间. 其中, 退化比例反映了退化规律在退化过程中对总的退化趋势影响程度, 反应时间常数反映了退化规律在退化过程中的主要作用时间.

当器件在退化过程中呈单调下降或单调上升趋势时, (13) 式中的  $i$  为 1; 当器件在退化过程中呈先上升后下降或先下降后上升等非单调退化趋势时, (13) 式中的  $i$  为大于 1 的整数. 器件在退化过程中退化量随时间先上升后下降或先下降后上升等非单调退化的实验现象如模拟图 1 所示, 图 1(a) 为退化量随时间呈先上升后下降的非单调形式退化, 图 1(b) 为退化量随时间呈先下降后上升的非单调形式退化. 在图 1 中的参数退化过程中存在两种退化规律, 即  $i = 2$ , 确定其模型参数, 建立参数退化模型. 因此, 本文提出的参数退化模型能够解释器件在退化过程中退化量随时间先上升后下降或先下降后上升等非单调退化的实验现象, 能够解决实验后拟合方法不能建立的非单调退化模型的问题. 并且能够分解出导致器件参数退化的多种退化规律, 量化每种退化规律的退化比例及时间常数, 如模拟图 1 所示. 本模拟图中有两种退化规律, 使得退化量减小的退化规律记为  $y_1$ , 使得退化量增大的退化规律记为  $y_2$ , 两种退化规律的退化比例及时间常数如表 1 所示.

因此, 利用本模型可以分解得到每种退化规律, 而且得到每种退化规律对应的退化比例及时间常数, 快速评价器件的可靠性.

### 3 实验

以 GaN LED 作为实验样品, 对本文提出的参数退化模型进行验证. GaN LED 结构示意图如图 2 所示.

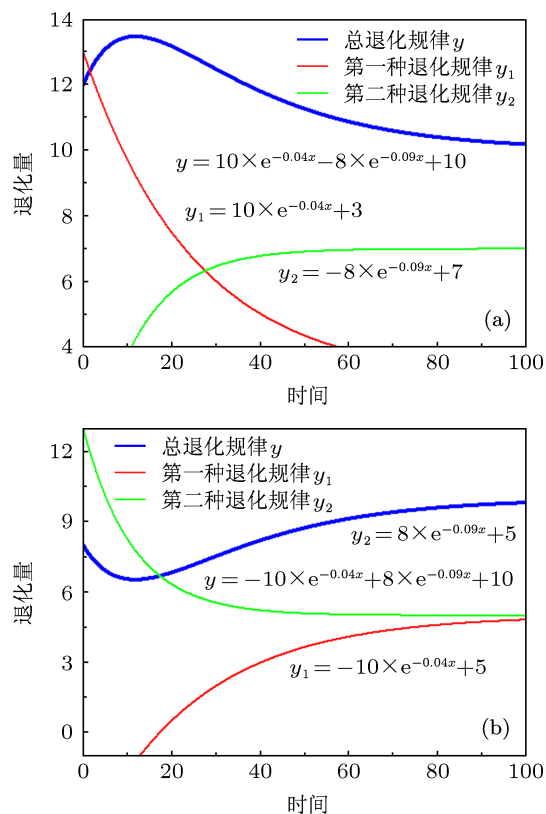


图 1 (a) 退化量随时间先上升后下降退化模拟图; (b) 退化量随时间先下降后上升退化模拟图

表 1 模拟图 1 退化模型中的退化比例及时间常数

模型参数	参数值
$N_{a1}$	10
$\tau_{a1}$	-0.04
$N_{a2}$	-8
$\tau_{a2}$	-0.09
$N_{b1}$	-10
$\tau_{b1}$	-0.04
$N_{b2}$	8
$\tau_{b2}$	-0.09

由于线下测量给实验带来温度冲击以及电流冲击误差, 本文采用线上测量<sup>[14]</sup>, 消除误差, 实时采集实验退化数据, 提高退化模型的准确性. 实验采用自动化实验和测量系统, 以计算机作为控制端, 以国际通用接口 IEEE-488 总线为数据通信基础, 用 HP-VEE 程序控制实验, 实现电应力和恒定温度应力的准确加载以及实验结果的实时测量和保存. LED 的正向电压  $V_F$  是判定 LED 性能的重要参数, 它的数值取决于半导体材料的特性、芯片的尺寸以及器件的 pn 结与电极制作工艺<sup>[15]</sup>. 由于测量的简便性, 在工程上可以通过监控 LED 的正向电压  $V_F$  从而判断 LED 的好坏<sup>[16]</sup>. 因此, 本实验主要研

究 GaN LED 正向电压随时间的退化过程. 本文对 GaN LED 施加 110°C 恒定温度应力以及 350 mA 恒定电流, 研究 GaN LED 的退化规律, 对 GaN LED 正向电压进行在线测量, 每隔 2 h 采集一次 GaN LED 的正向电压, 通过 GaN LED 的正向电压退化规律建立准确的退化模型, 评估器件的可靠性.

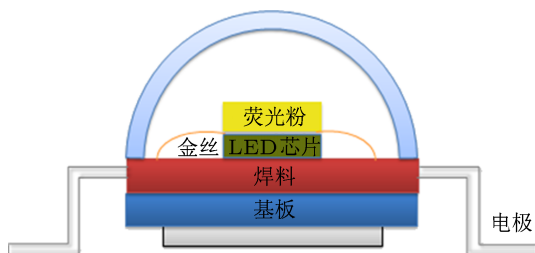


图2 GaN LED 结构示意图

### 4 结果分析

GaN LED 的正向电压退化规律如图 3 所示, GaN LED 的正向电压随时间先上升后下降退化. 本实验在线上测量的同时, 每隔 2 天对 GaN LED 器件进行线下光学参数的测试, 因此 GaN LED 的正向电压有跳变现象. 基于参数退化的理论模型, 对 GaN LED 正向电压的退化规律进行拟合. 根据退化规律拟合结果确定退化模型的参数, 建立参数退化模型. 根据 (13) 式可知, GaN LED 的正向电压退化模型为

$$V_F = N_1 \exp\left(-\frac{X}{\tau_1}\right) + N_2 \exp\left(-\frac{X}{\tau_2}\right) + y_0$$

$$= y_1 + y_2,$$

其中,  $N_1$  为第一种退化规律  $y_1$  的退化比例,  $\tau_1$  为第一种退化规律  $y_1$  的时间常数,  $N_2$  为第二种退化规律  $y_2$  的退化比例,  $\tau_2$  为第二种退化规律  $y_2$  的时间常数,  $y_0$  为常数.  $N_1$  和  $N_2$  体现退化规律  $y_1$  和  $y_2$  在退化过程中对退化量的影响程度,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  表征退化规律  $y_1$  和  $y_2$  在退化过程中的主要作用时间. 对 GaN LED 正向电压的退化规律进行拟合, 得到退化模型的各参数, 建立参数退化模型, 如图 3 所示. 因此, GaN LED 在 110 °C, 350 mA 加速条件下正向电压的退化模型为

$$V_F = -7.98 \times \exp\left(-\frac{x}{266.3349}\right) + 8.0156 \times \exp\left(-\frac{x}{272.3349}\right) + 2.925.$$

退化量随时间先上升后下降, 退化模型呈指数叠加形式.

由图 3 可知, GaN LED 器件的正向电压退化规律中包含两种退化规律, 基于 GaN LED 器件正向电压参数退化模型, 对 GaN LED 器件正向电压的退化规律进行分解, 得到两种退化规律, 两种退化规律对应的退化比例分别为 -7.98 和 8.0156, 两种退化规律的时间常数分别为 266.3349 和 272.3349, 如表 2 所示. 退化比例反映了退化规律在退化过程中对总的退化趋势影响程度, 时间常数反映了退化规律在退化过程中的主要作用时间. 以上两种退化规律的退化比例和时间常数相近表明, 在退化过程中, 两种退化规律是共存的, 两种退化规律相互制约, 且对总退化规律的影响程度相近, 从而使得总退化趋势减弱, 导致参数退化程度变小.

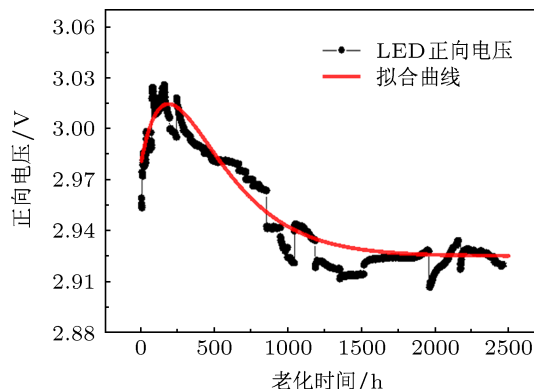


图3 GaN LED 样品正向电压的退化规律及拟合结果

表2 GaN LED 正向电压退化模型中的退化比例及时间常数

模型参数	参数值
$N_1$	-7.98
$\tau_1$	266.3349
$N_2$	8.0156
$\tau_2$	272.3349
$y_0$	2.925

GaN LED 器件在 110 °C, 350 mA 的条件下, 正向电压随老化时间的退化呈先增大后减小的非单调退化规律, 分解退化规律得到两种退化规律, 如图 4 所示. GaN LED 器件的正向电压增大是因为串联电阻增大, 在电流恒定为 350 mA 时, 器件的正向电压增大 [17,18], 退化量随着时间逐渐增大, 如图 4 中第一种退化规律. 随着老化时间的延长, GaN LED 器件的发光效率下降, 使得 GaN LED 器件的热功率增加, 从而导致 pn 结温度升高, 正向电压下降 [15], 退化量随着时间逐渐减小, 如图 4 中第二种

退化规律. 因此, 利用本文提出的参数退化模型, 可以快速评价 GaN LED 器件的可靠性.

## 5 结论

本文基于反应动力学中的均相反应动力学方程, 结合器件内部物理化学反应速率及反应量的浓度与反应温度的变化规律根, 据器件的退化数据建立了参数退化模型, 当器件在加速实验中非单调退化时, 退化模型呈指数的叠加形式. 本文提出的参数退化模型注重参数退化过程及失效前的参数变化规律, 从物理机理上解释了参数退化的规律及趋势, 为参数退化模型的建立提供了理论基础, 避免了通过实验后拟合选择模型的盲目性. 而且解释了器件在退化过程中退化量随时间单调上升或单调

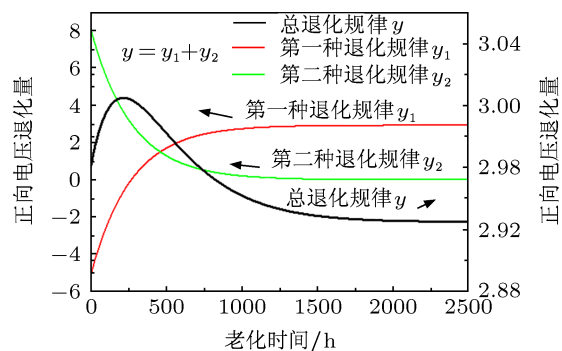


图4 GaN LED 器件的正向电压的总退化规律与两种退化规律分解图

下降的单调退化, 先上升后下降或先下降后上升等非单调退化的实验现象, 解决了实验后拟合方法不能建立的非单调退化模型问题.

感谢吕长志研究员对本文工作给予的指导和帮助.

- [1] Jiang R, Lu H, Chen D J, Ren F F, Yan D W, Zhang R, Zheng Y D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 047805
- [2] Yan Q R, Yan Q A, Shi P P, Niu Q L, Li S T, Zhang Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 026102
- [3] Xue Z Q, Huang S R, Zhang B P, Chen C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5002 (in Chinese) [薛正群, 黄生荣, 张保平, 陈朝 2010 物理学报 **59** 5002]
- [4] Hu J, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, Zhou J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1384 (in Chinese) [胡瑾, 杜磊, 庄奕琪, 包军林, 周江 2006 物理学报 **55** 1384]
- [5] Meeker W Q, Escobar L A, Lu C J A 1998 *Technometrics* **40** 89
- [6] Grillo P N, Krames M R, Zhao H, Teoh S H 2006 *IEEE Trans. Device Mater. Rel.* **6** 564
- [7] Huang J S 2005 *IEEE Trans. Device Mater. Rel.* **5** 150
- [8] Geng X M, Zhang J P, Xie X Z, Zhao K R 2005 *Chinese Journal of Electron Devices* **28** 714 (in Chinese) [耿新民, 张建平, 谢秀中, 赵科仁 2005 电子器件 **28** 714]
- [9] Wang L, Li X Y, Jiang T M, Wan B 2009 *8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety* Chengdu, China, July 20–24 2009 p1313
- [10] Fan J J, Yung K C, Pecht M 2012 *IEEE Trans. Device Mater. Rel.* **12** 470
- [11] Zhou Y G, Ye X R, Zhai G F 2011 *Prognostics and System Health Management Conference* Shenzhen, China, May 24–25 2011 p1
- [12] Chen H T, Yuan H J 2011 *IEEE 17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* Xiamen China, October 29–31, 2010 p958
- [13] Deng A M, Chen X, Zhang C H, Wang Y S 2007 *Acta Armamentarii* **8** 1002 (in Chinese) [邓爱明, 陈循, 张春华, 汪亚顺 2007 兵工学报 **8** 1002]
- [14] Guo C S, Wan N, Ma W D, Xiong C, Zhang G C, Feng S W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 128501 (in Chinese) [郭春生, 万宁, 马卫东, 熊聪, 张光沉, 冯士维 2011 物理学报 **60** 128501]
- [15] Yang J F, Zhang J F, Zhang X K, Zhang X B 2011 *Experimental Technology and Management* **28** 26 (in Chinese) [杨景发, 张建平, 张晓凯, 张锡冰 2011 实验技术与管理 **28** 26]
- [16] Fons Janssen 2009 *EDN China* **16** 46 (in Chinese) [Fons Janssen 2009 电子设计技术 **16** 46]
- [17] Si F H 2008 *Electronics & Packaging* **8** 12 (in Chinese) [斯芳虎 2008 电子与封装 **8** 12]
- [18] Yang L Ma X H Feng Q, Hao Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2696

# The investigation of LED degradation model based on the chemical kinetics\*

Guo Chun-Sheng<sup>†</sup> Zhang Yan-Feng Wan Ning Li Rui Zhu Hui Feng Shi-Wei

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 21 June 2013; revised manuscript received 17 July 2013)

## Abstract

The degradation of a device can be described by the degradation model in the accelerated tests. Because the degradation is closely related to the degradation mechanism, which reflects the intrinsic physical or chemical reactions, the degradation model can be established based on the temperature effect on the reaction rate and the change of reaction volume concentration in the physical/chemical reactions. Different degradation processes can be studied using the degradation model, including both the monotonic and nonmonotonic degradation processes. Moreover, the accelerated test is carried out for the GaN LED, figuring out the parameters for the degradation model, the ratio of different degradation processes, and the time constant.

**Keywords:** parameter degradation model, chemical kinetics, accelerated test, GaN LED

**PACS:** 85.60.Jb, 73.61.Ey, 05.20.Dd, 05.70.Ce

**DOI:** 10.7498/aps.62.218503

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61204081), the Research projects in Guangdong Province (Grant No. 61204081), and the Major science and technology special project of Guangdong province, China (Grant Nos. 2012A080304003, 2011A080801005).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: guocs@bjut.edu.cn