

# GaN 发光二极管的老化数学模型及寿命测试方法

余 菲 金 雷

(中国科学院深圳先进技术研究院生物光子中心, 广东 深圳 518055)

**摘要** GaN 发光二极管因其寿命、效率和环保等优点得到了广泛的应用。寿命问题一直是限制 GaN 发光二极管应用的核心问题。为了研究 GaN 发光二极管的老化过程, 计算了 GaN 发光二极管物理参数, 分析了 GaN 发光二极管的深能级缺陷和非辐射复合中心增加的老化原理, 并且针对该原理的老化过程进行物理原理的分析推导, 进而建立了老化数学模型。同时, 利用一组实际的 GaN 发光二极管大应力老化实验的数据进行计算, 提出了利用该数学模型的 GaN 发光二极管寿命的测试方法和数学计算方法, 并计算出实验 GaN 发光二极管的寿命数值。提出的 GaN 发光二极管老化数学模型对比传统的阿伦纽斯模型具有针对性强、物理意义明显和寿命预测准等优点, 具有很好的实际应用价值。

**关键词** 光学器件; GaN; 白光 LED; 发光二极管; 老化; 寿命

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0806001

## Mathematical Model of Aging and the Life Test Method for GaN LED

Yu Fei Jin Lei

(Center for Biophotonics Engineering, Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

**Abstract** GaN LED has got an extensive application for its life, efficiency, environmental protection and other advantages. The life question has been the core question, which limits the application of the GaN LED. In order to research the GaN LED aging process, calculate GaN LED physical parameters, such as life time and so on, the aging principle of deep level GaN LED defects and the non-radiation recombination centers increasing are analyzed. And according to the principle, we analyze the physical theory of GaN LED aging process, and finally establish an aging mathematical model for a GaN LED. Meanwhile, through a calculation of a set of practical GaN LED big stress aging experiment data with the aging mathematical model, a test method and mathematics calculation method of the life time are established, and finally we calculate the experimental GaN LED life value. Compared with the traditional Allen News model, the GaN LED aging mathematical model has many advantages such as strong pertinence, obvious physical meaning and more accurate life prediction, and has a very good application value.

**Key words** optical devices; GaN; white LED; light-emitting diode; aging; life time

**OCIS codes** 160.5293; 230.3670; 160.4670; 160.6000

## 1 引 言

随着节能环保意识的提高, 固态照明技术作为下一代照明技术成为当前研究的热点<sup>[1,2]</sup>。固态照明是指使用无机物半导体材料发光, 作为照明光源的技术。GaN 被认为是第三代半导体材料, 具有禁带宽度大、电子饱和漂移速度高和导热性能良好等特性, 特别适合于制作高频、大功率电子器件<sup>[3]</sup>, 以

GaN 为基础的白光发光二极管(LED)因其具有效率高、寿命长和环保等诸多优点, 成为固态照明技术的主流<sup>[4,5]</sup>。而 GaN 白光发光二极管的寿命和光衰问题也是成为制约 LED 商业化的主要问题之一<sup>[6]</sup>。GaN 发光二极管的老化是导致芯片、封装、荧光粉区域失效等寿命问题和光衰问题的主要原因<sup>[4]</sup>。主要的老化机理包括暗点缺陷、金属合金迁移、组分变

收稿日期: 2011-02-17; 收到修改稿日期: 2011-04-01

作者简介: 余 菲(1982—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事 THz 成像方面的研究。E-mail: fei.yu@sub.siat.ac.cn

导师简介: 金 雷(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事生物光子学方面的研究。E-mail: lei.jin@sub.siat.ac.cn

化等<sup>[7]</sup>。其中芯片中的深能级缺陷和非辐射复合中心的增加对 LED 的老化具有重要的影响<sup>[8,9]</sup>。

本文根据深能级缺陷和非辐射复合中心的增加原理,通过分析 GaN 发光二极管的老化机理,提出了老化过程的数学模型,并且根据该模型提出了相应的 GaN 发光二极管的寿命测试方法。

## 2 GaN 发光二极管老化过程的数学模型

### 2.1 GaN 发光二极管老化过程的研究方法

研究 GaN 发光二极管的老化过程的主要意义是测试并推算 GaN 发光二极管的寿命。到目前为止,都将半寿命作为 LED 的寿命,即光输出衰减到初始值的 50% 所用的时间<sup>[10]</sup>,本文沿用这种定义。由于 GaN 发光二极管的理论寿命一般在  $1 \times 10^5$  h 左右,而实际寿命也在  $2 \times 10^4$  h 以上,因此常规应力的方法已经很难对其寿命进行研究。在实际研究过程中,常采用大应力的方式加速 GaN 发光二极管老化过程,进而得到最终寿命,以及得到在老化过程中的一些必要参数<sup>[10,11]</sup>。针对 GaN 发光二极管的电学和材料学的特点,影响其老化过程的应力有两种:一种是温度,一种是通过 GaN 发光二极管的电流强度。通过单一加大某种应力或者同时加大两种应力的方法,可以得到大应力的老化过程,进而通过数学模型推算出寿命。

### 2.2 阿伦纽斯模型

目前国内外研究老化过程主要使用阿伦纽斯模型。阿伦纽斯模型是普遍适用于各种材料和器件老化的模型,包括基本模型、对数模型、指数模型和阿伦纽斯-威布尔模型等几种单一应力模型,以及复合应力模型。在 GaN 发光二极管老化过程中,假设增加温度应力,可认为其寿命符合数学形式<sup>[12]</sup>

$$t = c \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

式中  $E_a$  是器件的激活能;  $k$  是玻尔兹曼常量,为  $0.8617 \times 1024$  eV/K;  $T$  是绝对温度;  $c$  是器件的常数,和时间有相同的单位。

只要测得白光 LED 某一温度下光通量达到开始值一半时所经历的时间  $t'$ , 根据一般的激活能  $E_a$  值,就可以预测其寿命为

$$t = t' \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right)\right]. \quad (2)$$

通常采用 373 K 的温度条件下进行测试,取  $E_a = 0.5$  eV, 一般 GaN 发光二极管典型的寿命是 250 h, 可推知典型的常温寿命约为  $2 \times 10^4$  h。

### 2.3 基于深能级缺陷和非辐射复合中心原理的数学模型

国内外的研究表明<sup>[8,9]</sup>, 深能级缺陷和非辐射复合中心的不断产生是造成 GaN 发光二极管老化的重要原因。而 Mg-H 化合物的存在是造成复合中心和深能级缺陷出现的原因。由于载流子的作用,不断地激发 Mg-H 化合物发生电离等作用,从而形成深能级缺陷和非辐射复合中心,导致了电子和空穴的复合,这些复合中心的能量不足以导致发出光子,能量以声子或者热能的形式散出,降低了发光效率。

首先定义深能级缺陷和非辐射复合中心的数目为  $R_c$ , 由于深能级缺陷和非辐射复合中心的来源被认为是 Mg-H 化合物的电离,因此,只要高于 Mg-H 化合物的电离化学能的载流子就有机会造成 Mg-H 化合物的电离。设高于 Mg-H 化合物的电离化学能的载流子数目为  $N_h$ , 由于载流子能量分布满足费米分布函数,所以可以认为,  $R_c$  和  $N_h$  对时间的积分成正比例关系

$$R_c \propto \int_0^t N_h(t) dt. \quad (3)$$

根据费米分布函数,对载流子数目进行积分,设载流子的有效态密度为  $N_g$ , Mg-H 化合物的电离能量为  $E_c$ , 费米能级为  $E_F$ , 根据固体物理知识,可以对费米分布函数进行积分,得到

$$N_h = N_g \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (4)$$

$N_h$  数量很小,在常态下基本上和电离后复合的数量相等。但是当载流子出现输运现象以后,载流子都增加了动能,根据电子运动公式,假设载流子有效质量为  $m^*$ , 可知此时的载流子定向运动的动能  $E$  为

$$E = \frac{1}{2} m^* \left(\frac{I}{nqs}\right)^2. \quad (5)$$

在上述条件下,载流子不需要具备  $E_c$  的能量就能引起 Mg-H 化合物的电离,而只需要具备  $E_c - E$  的能量即可,代入(5)式,(4)式可变为

$$N_h = N_g \exp\left\{\left[E_c - E_F - \frac{1}{2} m^* \left(\frac{I}{nqs}\right)^2\right] / (kT)\right\}. \quad (6)$$

假定电流一定的条件下,定义一个短暂的时间过程  $\Delta t$ , 设定  $\Delta t$  时间内需要输运的载流子为  $n$ , 设定输运的有效长度为  $L$ , 在数量为  $R_c$  深能级缺陷和非辐射复合中心的作用下,可知经过一个  $dL$  的长度以后损失的载流子数量  $dn$  为

$$\begin{aligned} dn &\propto -nR_c \times dL \Rightarrow \\ \frac{dn}{n} &\propto -R_c \times dL \Rightarrow \\ \int_{n_0}^{n_1} \frac{dn}{n} &\propto - \int_0^L R_c \times dL \end{aligned}$$

所以

$$n_1 - n_0 \propto - \exp(-R_c L). \quad (7)$$

通过上面的分析可知,在一个短暂的时间过程  $\Delta t$  内,被复合掉的载流子数量  $\Delta n \propto \exp(-R_c L)$ 。在确定电流的条件下,单位时间通过导体横截面的电量为  $I$ ,单位时间内复合掉的不能发光的载流子数目应该正比于  $I$ ,因此,当忽略掉常数项以后,有效的发光电流设定为

$$I_0 \propto I \exp(-R_c L). \quad (8)$$

结合(3),(6)和(8)式,定义光输出率公式为

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{I_0}{I} \propto \exp(-R_c L) \propto \exp(-LN_g) \times \\ &\exp\left\{\frac{-E_c - E_F - m^* [I/(nqs)]^2 / 2}{kT}\right\} t. \quad (9) \end{aligned}$$

为了公式拟合方便,可采用等式的形式,并考虑前面讨论中忽略的常数项,可得到最终的 GaN

发光二极管的老化过程数学模型

$$\eta = a + b \exp\left[-c \exp\left(\frac{dI^2 + m}{kT}\right)t + p\right]. \quad (10)$$

式中  $a, m, p$  为不定符号常数,  $b, c, d$  为正符号常数。令  $t$  趋于无穷,效率趋于 0,可得  $a = 0$ ,且满足归一化方程

$$1 = a + b \exp(p) = b \exp(p). \quad (11)$$

### 3 模型参数确定的寿命推算

#### 3.1 GaN 发光二极管的老化测试

为了得到 GaN 发光二极管的寿命,要确定模型中的待定参数  $a, m, p, b, c, d$ 。要得到这些参数,需要利用加大应力的测试方法,进行老化实验。

陈宇彬<sup>[13]</sup>完成了一组白光 LED 的老化试验。其在老化板上选取 4 组普通炮弹封装的 5 mm 白光 LED,分别通入 40, 60, 80 mA 的直流电进行老化,选取一定时间间隔取出,用 SSP3112LED 光谱波长分析系统测试光通量参数。通过对数据处理,得到白光 LED 的光通量随老化时间的变化曲线,如图 1 所示。

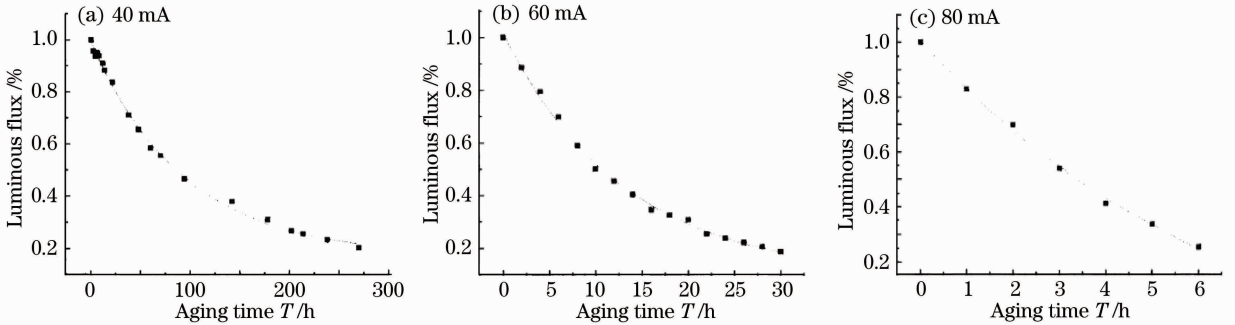


图 1 不同电流应力下的老化曲线

Fig. 1 Aging curves with different currents

#### 3.2 模型参数的求解方法

为了确定模型中的参数,可以代入不同电流应力下的老化曲线实验数据,进而求解方程。由于这个方程是超越方程,不能使用简单的线性代数知识求解,需要按照一定特殊过程来求解。

首先把归一化条件(11)代入(10)式,可得

$$c \exp\left(\frac{dI_0^2 + m}{kT}\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{-\ln \eta_i}{t_i} = f(I_0). \quad (12)$$

当测试电流不变时,代入该电流应力测试下的实验数据点  $(\eta, t)$  的数值,可得到(12)式中  $f(I_0)$  的计算结果。进行 3 组电流应力老化实验,设 3 次电流应力测试的电流分别为  $I_1, I_2, I_3$ ,则可以得到

$$\left\{ \begin{aligned} c \exp\left(\frac{dI_1^2 + m}{kT}\right) &= f(I_1), & (13a) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} c \exp\left(\frac{dI_2^2 + m}{kT}\right) &= f(I_2), & (13b) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} c \exp\left(\frac{dI_3^2 + m}{kT}\right) &= f(I_3), & (13c) \end{aligned} \right.$$

用(13a),(13b),(13c)式其中任意 2 个表达式做比运算,可得到  $d$  的取值,以采用(13a),(13b)为例

$$d = \frac{\ln [f(I_1)/f(I_2)]}{I_1^2 - I_2^2} kT. \quad (14)$$

理论上只要进行 2 次不同的电流应力的老化实验,就可以解得  $d$  的绝对值,如果能够进行多组电

流老化实验,多次求解取平均值可得较为准确的  $d$  数值,定义为  $d_0$ 。

这样就可以消元一个未知参数  $d$ ,将归一化(11)式代入(10)式可以得到

$$\eta = \exp\left[-c \exp\left(\frac{d_0 I^2 + m}{kT}\right)t\right], \quad (15)$$

(15)式中含有的  $\eta, I, t$  是实验数据,而  $c$  和  $m$  是尚未求解的参数,也就是方程的未知数。要求解(15)式,需要代入不同的实验数据来进行求解。但是该方程仍然是超越方程,对(15)式两边取自然对数运算后可以变换为

$$c \exp\left(\frac{m}{kT}\right) = -\frac{\ln \eta}{t} \exp\left(-\frac{d_0 I^2}{kT}\right). \quad (16)$$

设实验数据是  $\eta = f(I, t)$  的函数,如果代入实验数据到(16)式则可得到一个关于  $c$  和  $m$  的解,定义为  $S_0$

$$c \exp\left(\frac{m}{kT}\right) = -\frac{\ln \eta}{t} \exp\left(-\frac{d_0 I^2}{kT}\right) = S_0, \quad (17)$$

$$S_0 = \frac{1}{gn} \sum_{q=1}^g \sum_{i=1}^n \left[ -\frac{\ln \eta_i}{t_i} \exp\left(-\frac{d_0 I_q^2}{kT}\right) \right], \quad (18)$$

式中  $g$  为测试电流应力老化曲线的数量,  $n$  为每条曲线上面的采样点数量。利用  $S_0$  中消去(15)式中的  $c$ , 则可以得到最终的表达式为

$$\eta = \exp\left[-S_0 \exp\left(\frac{d_0 I^2}{kT}\right)t\right]. \quad (19)$$

### 3.3 GaN 发光二极管的寿命推算结果

在前文所述的实验中,测试了 3 条电流应力曲线,舍去部分极端数据后,代入(14)式可得

$$d_0 \approx 0.002kT, \quad (20)$$

把(20)式的结果代入(18)式,可计算出  $S_0 \approx 3.25 \times 10^{-5}$ 。从(19)式的数学形式可知,当发光二极管处于常规应力的时候,其寿命趋近于令  $I=0$  的极限情况。令  $I=0$ ,可推算出寿命极限值约为  $2.1336 \times 10^4$  h。

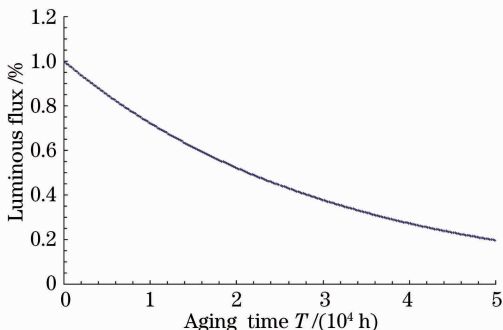


图 2 正常使用的老化曲线

Fig. 2 Aging curve with normal usage

把所有的参数代入(19)式中,令  $I=0$ ,最终可以得到如图 2 所示的正常使用的老化曲线。

## 4 结 论

GaN 发光二极管的寿命和老化问题一直是阻碍其发展的重要原因。而阿伦纽斯模型作为目前主要的老化过程数学模型,虽具有通用性好的优点,但同时也存在针对性差、不能反映物理意义等缺点。本文提出的数学模型从数学形式上兼容了阿伦纽斯模型,并针对老化的物理原理进行了研究。

通过对深能级缺陷和非辐射复合中心的增加导致老化的物理过程的分析,建立 GaN 发光二极管老化过程的数学模型,同时,针对模型的较为复杂的数学形式,提供了一套很好的参数求解方法,并且通过一个具体的实验数据,成功估算出了 GaN 发光二极管的寿命。

深能级缺陷和非辐射复合中心的增加导致老化模型的建立,对完善老化机制的数学模型提供了重要的基础。提出的解参数的过程,作为参数求解的一种方法,为参数求解方式提供了有效的手段。

## 参 考 文 献

- Liu Xingren. The fluorophor of light transforming in solid-state white light LEDs[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2007, **28**(3): 291~301  
刘行仁. 白光 LED 固态照明光转换荧光体[J]. *发光学报*, 2007, **28**(3): 291~301
- Zhu Zhenmin, Qu Xinghua, Liang Haiyu *et al.*. Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0115001  
祝振敏,曲兴华,梁海昱等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0115001
- Dai Yutang, Xu Gang, Cui Jianlei *et al.*. Micro etching of GaN-based semiconductor materials using 157 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3138~3142  
戴玉堂,徐刚,崔健磊等. GaN 基半导体材料的 157 nm 激光微刻蚀[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3138~3142
- Zhang Guoyi, Chen Zhizhong. The basis of solid state lighting—GaN white light emitting diodes[J]. *Physics*, 2004, **33**(11): 833~842  
张国义,陈志忠. 固态照明光源的基石——氮化镓基白光发光二极管[J]. *物理*, 2004, **33**(11): 833~842
- Zhou Yinhua, Tang Yingwen, Rao Jianping *et al.*. Improvement for extraction efficiency of vertical GaN-based LED on Si substrate by photo-enhanced wet etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 252~255  
周印华,汤英文,饶建平. 光增强湿法刻蚀提高 Si 衬底垂直结构 GaN 基 LED 的出光效率[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 252~255
- Peng Jie. The major problem of high power LED application[J]. *Light Source and Lighting*, 2004, (3): 4~7  
彭捷. 高功率 LED 应用中的主要问题[J]. *光源与照明*, 2004, (3): 4~7
- Chen Huanting, Lü Yijun, Chen Zhong *et al.*. The analysis of

- the aging mechanism of GaN blue-ray LED based on capacitance and electrical properties[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5070~5074
- 陈焕庭, 吕毅军, 陈 忠 等. 基于电容和电导特性分析 GaN 蓝光发光二极管老化机理[J]. *物理学报*, 2009, **58**(8): 5070~5074
- 8 F. Manyakhin, A. Kovalev, A. E. Yunovich. Aging mechanisms of InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes operating at high currents [J]. *MRS Internet J. Nitride Semiconductor Research*, 1998, **53**(3): 1~6
- 9 Zheng Daishun, Qian Keyuan, Luo Yi. Life test and failure mechanism analyses for high power LED high power LED[J]. *Semiconductor Optoelectronic*, 2005, **26**(2): 87~127
- 10 Liu Xijuan, Wen Yan, Zhu Shaolong. The definition of the life of white LED and testing methods [J]. *J. Light Source and Lighting*, 2001, (4): 16~22
- 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
- 11 Chen Zhizhong, Qin Zhixin, Hu Xiaodong *et al.*. The preparation and characterization of high power white LED[J]. *Liquid Crystal Display*, 2004, **19**(2): 83~86
- 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
- 12 S. Ishizaki, H. Kimura, M. Sugimoto. Lifetime estimation of high power white LEDs [J]. *J. Light & Vis. Env.*, 2007, **31**(1): 11~18
- 13 Chen Yubin. The Aging Mechanism Research of White LEDs [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007. 44~52
- 陈宇彬. 白光 LED 老化机理研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2007. 44~52