

文章编号: 1000-7032(2008)02-0358-05

# 温度和电流对白光 LED 发光效率的影响

王 健<sup>1,2</sup>, 黄 先<sup>1,2</sup>, 刘 丽<sup>1,2</sup>, 吴 庆<sup>1,2</sup>, 褚明辉<sup>1</sup>, 张立功<sup>1</sup>,  
侯凤勤<sup>1</sup>, 刘学彦<sup>1</sup>, 赵成久<sup>1</sup>, 范 翊<sup>1</sup>, 罗劲松<sup>1</sup>, 蒋大鹏<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 对大功率白光 LED 发光效率进行了研究, 得出温度和电流对 LED 发光效率的影响: 随着温度的升高, 势阱中辐射复合几率降低, 从而降低了发光效率; 电流的升高, 使更多的非平衡载流子穿过势垒, 降低了发光效率。LED 工作时, 过高的工作温度或者过大的工作电流都会产生明显的光衰: 如果 LED 工作温度超过芯片的承载温度, 这将会使 LED 的发光效率快速降低, 产生明显的光衰, 并且对 LED 造成永久性破坏; 如果 LED 的工作电流超过芯片的饱和电流, 也会使 LED 发光效率快速降低, 产生明显的光衰。并且 LED 所能承载的温度与饱和电流有一定关系, 散热良好的装置可以使 LED 工作温度相对降低些, 饱和电流也可以更大, LED 也就可以在相对较大的电流下工作。

**关键词:** LED; 发光效率; 温度; 电流; 势垒

**中图分类号:** O482.31 **PACC:** 3250F; 7860

**文献标识码:** A

## 1 引 言

大功率发光二极管以其节能、环保、寿命长、高可靠性等特点, 逐步成为取代传统光源的下一代照明光源。进一步提高白光 LED 发光效率已经成为半导体照明项目的主要研究内容<sup>[1,2]</sup>。白光 LED 已被公认为 21 世纪最具潜力之环保照明光源, 现今白光 LED 发光效率已达到 40 lm/W 以上, 在学术实验方面更已达到 100 lm/W, 与目前发光效率 80 lm/W 的荧光灯相比有过之而无不及, LED 依然在蓬勃发展, 相信当发光效率 100 lm/W 的白光发光二极管可大量商品化时, 就可以全面性取代白炽灯与荧光灯, 成为市场上另一波照明光源主流。本文主要研究影响 LED 发光效率的几个因素, 为提高 LED 发光效率做了理论工作。以前人们对白光 LED 发光效率做了很多研究, 证明温度升高导致芯片的蓝光波峰向长波方向偏移, 使芯片的发射波长和荧光粉的激发波长不匹配造成了白光 LED 发光效率的降低, 并且还研究发现, 当温度高于 50 °C 时, 色温偏高, 显色

指数变劣。主要是由于温度升高, 蓝光波峰长移, 荧光粉波峰变平坦而劣化<sup>[3~7]</sup>。本文结合实验和理论分析, 也对白光 LED 发光效率进行研究, 得出温度的升高减小了芯片在发光区的辐射复合效率, 并且电流增加可能使非平衡载流子扩散出势阱, 不能有效的辐射光子, 这两点也是白光 LED 发光效率下降的原因。

## 2 实 验

选择同一批次的美国 Semileds 40m il 大功率蓝光芯片, 用两种尺寸不同的热沉封装大功率 LED, A 结构采用半径 10 mm, 厚度 1 mm 铝基线路板为热沉, 封装单个 LED 蓝光芯片; B 结构采用 180 mm × 120 mm × 2 mm 的长方体铝基线路板为热沉, 集成封装 8 个 LED 蓝光芯片。两种结构都采用发散角为 90°透镜封装, 中间填充物采用有机硅凝胶, 以减少光学界面, 提高光的输出效率。使用 QG J-7 球型光度计和 MPF-4 荧光光度计测光系统来测量 LED 的光通量, 使用 MNT-EMP 测量热沉温度。用以上设备测量 LED 的光

收稿日期: 2007-08-17 修订日期: 2007-10-26

作者简介: 王健(1980-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事半导体发光材料与器件的研究。

E-mail: wangchaoshu@163.com

\* : 通讯联系人; E-mail: jlp863@ciomp.ac.cn Tel: (0431) 86176299

通量、温度、电流、电压等数据, 经数据整理, 得到稳定工作中的 LED 的光通量随电流变化曲线和发光效率随电流变化曲线。

### 3 结果与讨论

图 1 给出了两种散热结构 (A 结构和 B 结构) 随电流增大温度升高曲线。从图 1 可以看出, B 结构的散热效果远远好于 A 结构, 在 A 散热结构中, 当电流增大至 750 mA 时, 温度达到 393 K, 在 B 散热结构中, 当电流增大至 1 300 mA 时, 温度只有 370 K。图 2 给出了两种结构的光通量随着电流的变化曲线。图 2 显示, A 结构的饱和电流为 700 mA, 而 B 结构的饱和电流为 1 250 mA。

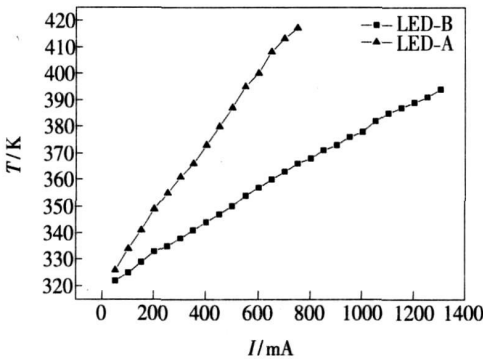


图 1 A, B 散热结构 LED 随着电流的温升曲线  
Fig 1 T-I curves of LED with structure A and B

结合图 1 和图 2 我们可以看出, A 结构由于散热效果差, 它的饱和电流只有 700 mA, 电流高于 700 mA 出现明显的光衰。同样的芯片在 B 结构中, 当电流达到 1 000 mA 时没有看到明显的光衰, 因此, 我们认为 A 结构中的光衰主要是由于温升造成的, 这种芯片的最大承载温度为 383 ~ 393 K。另外我们也可以看出, 由于 B 结构的散热

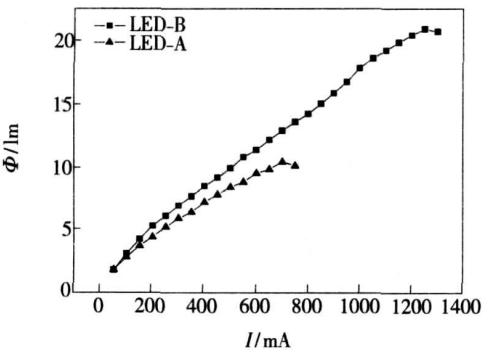


图 2 A, B 散热结构 LED 的 Φ-I 曲线  
Fig 2 Φ-I curves of LED with structure A and B

效果好, 它的饱和电流达到 1 250 mA, 电流低于 1 250 mA 时没有发现明显光衰, 由于 1 250 mA 时, 温度只有 367 K, 没有达到芯片的承载温度, B 结构 LED 的光衰主要来自于工作电流的增加。

以前人们就注意到白光 LED 发光效率是随着温度的升高而下降的, 并且认为温度的升高使蓝光芯片的发射波长红移, 这样芯片的发射波长和荧光粉的激发波长越来越不匹配, 所以降低了白光 LED 的发光效率。我们得出, 即使不存在波长匹配的问题, 白光 LED 的发光效率也会随着温度的升高而下降。如图 3 所示, 不涂荧光粉的蓝光芯片的发光效率随着温度升高是减小, 因此, 由蓝光芯片与涂覆其上的荧光粉所转化成白光的发光效率也会随着温度的升高而下降。所以, 白光发光效率随着温度升高而下降, 就不仅仅是以前人们认为的芯片的发射波长和荧光粉的激发波长不匹配造成的, 还包括有芯片本身的发光效率随着温度升高而下降所造成的。

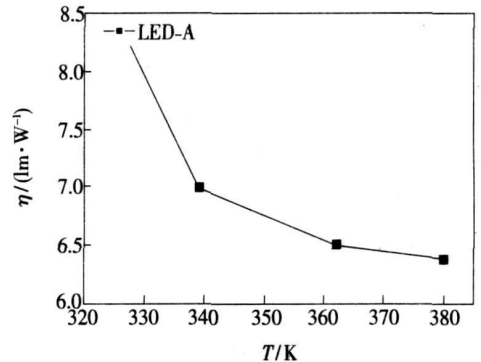


图 3 A 结构在 50 mA 下发光效率随温度变化曲线  
Fig 3 η-T curve of LED-A operating at 50 mA.

发光效率随着温度升高而减小的原因从理论上分析如下:

根据 Van Roosbroeck-Shockley 关系<sup>[8]</sup>, 物体的发射率为

$$L(\nu) \approx 8\pi\nu^2 n^2 \alpha(\nu) \exp(-h\nu/k_B T) / c^2 \quad (1)$$

$n$  是折射率,  $\alpha(\nu)$  是吸收系数。

对于电致发光的 LED 结型半导体, 频率为  $\nu$  的光子发射率

$$L(\nu) = n_u n_l W_{em} = n_i^2 W_e \quad (2)$$

$n_u$  是上能级被占据的电子态密度,  $n_l$  是下能级的空穴态密度,  $n_i$  是本征激发载流子密度。式 (1)、(2) 联立得为单位体积辐射跃迁几率

$$W_{em} = 8\pi\nu^2 n^2 \alpha(\nu) \exp(-h\nu/k_B T) / (c^2 n_i^2) \quad (3)$$

本征激发载流子密度的平方

$$n_i^2 = 2.32 \times 10^{30} (m_p^* m_n^* / m_0)^{3/2} T^3 \exp(-E_g / k_B T) \quad (4)$$

联立式 (3)、(4) 得单位体积辐射跃迁几率

$$W_{em} = 3.45 \times 10^{-30} \pi V^2 n^2 \alpha(V) (m_p^* m_n^* / m_0)^{-3/2} \cdot \exp[(E_g - h\nu) / k_B T] \cdot 1 / (T^3 c^2) \propto \exp[(E_g - h\nu) / k_B T] T^3 \quad (5)$$

由公式 (5) 看出频率为  $\nu$  的光子辐射跃迁几率是温度的减函数。也就是温度的升高降低了辐射复合率, 因此发光效率也会降低。

简单分析如图 4 的电子能带图, 在温度较低时, 电子占据导带底部的量子态, 随着温度的升高, 电子能量也会升高, 电子就会占据导带中能量高些的量子态。如图 4 所示, 导带中小矩形  $K_1$  是低温  $T_1$  下电子占据较低的量子态, 大矩形  $K_2$  是高温  $T_2$  下电子占据较高的量子态。随着温度的升高, 电子受到热激发跃迁到较高能态, 电子占据的量子态也由  $(-k_1, k_1)$  范围扩大为  $(-k_2, k_2)$ 。GaN 基蓝光芯片发光是直接复合发光, 其电子跃迁的选择定律为:  $k' = k$ 。由图上可以看出电子占据量子态范围小的  $(-k_1, k_1)$  满足选择定律的几率更大, 发生辐射复合的几率也大。电子占据量子态范围大的  $(-k_2, k_2)$  满足选择定律的几率相对小, 发生辐射复合的几率也小。因此温度的升高降低了辐射复合率, 从而发光效率也会降低。

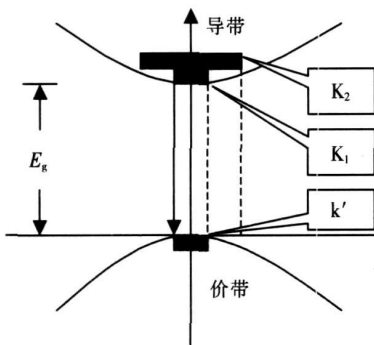


图 4 能带图  
Fig 4 Energy band

我们观察到同一温度下, LED 发光效率随着工作电流的增大而下降, 如图 5 是 A 结构 LED 在 353 K 下的  $\eta-I$  曲线, 这是内量子效率降低造成的。随着电流  $I$  的增加, 注入势阱中电子数量增加, 电子扩散出势阱的数量也将增加, 扩散出势阱中的电子越多, 内量子效率越小<sup>[9-10]</sup>。

如图 6 所示, 在电流为  $I$  时, 电子扩散到位置  $a$  处, 并且随着外加电流  $I$  的增加,  $a$  也将增大。把

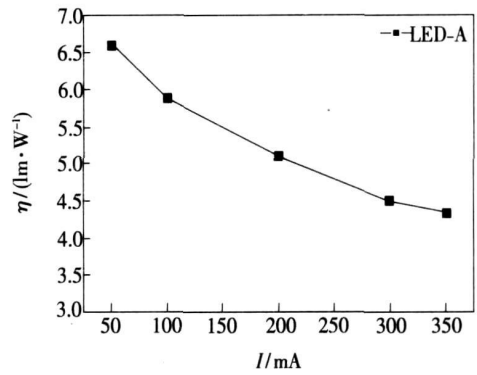


图 5 LED-A 在 353 K 下, 发光效率和电流的关系  
Fig 5  $\eta-I$  curve of LED-A at 353 K.

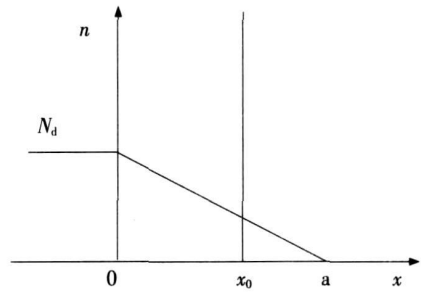


图 6 势阱中电子浓度分布

Fig 6 The electron concentration distribution in potential well

电子浓度分布近似成一定斜率的线段。势阱区域是  $0 \sim x_0$ , 在势阱左侧是 n 型半导体, 在势阱右侧是 p 型半导体。可以推出电子浓度分布:

$$n(x) = N_d(1 - x/a) \quad (6)$$

在  $(0, x_0)$  中的电子总数

$$N(\text{势阱内}) = N_1 = \iiint n(x) dV = A \int_0^{x_0} n(x) dx = AN_d(x_0 - x_0^2/2a) \quad (7)$$

在  $(x_0, a)$  内的电子总数

$$N(\text{势阱外}) = N_2 = \iiint n(x) dV = A \int_{x_0}^a n(x) dx = AN_d[a/2 + (x_0^2/2a) - x_0] \quad (8)$$

其中势阱内的电子总数和总共注入电子数量之比记为  $M$ , 称为有效电子比例。  $M$  越大, 内量子效率越高。

$$M = \frac{N_1}{N_1 + N_2} = x_0(2a - x_0)/a^2 \quad (9)$$

$M$  对  $a$  求导得

$$\frac{dM}{da} = 2x_0(x_0 - a)/a^3 < 0 \quad (10)$$

随着注入电子数量的增加,  $a$  也逐渐增大。  $a$  越

大,  $M$  越小, 内量子效率也越小。

$M$  对  $x_0$  求导得

$$\frac{dM}{dx_0} = 2(a - x_0)/a^2 > 0 \quad (11)$$

增加势阱宽度可以增加有效电子比例  $M$ , 也就增加了内量子效率。

因此, 随着注入电子数量的增加, 使更多的电子扩散出势阱, 发生无辐射复合, 降低了芯片的内量子效率, 进而降低了发光效率。同时, 推导的公式 (10) 得出了适当增加势阱宽度可以增加内量子效率。

## 4 结 论

由蓝光芯片加黄色荧光粉组成的白光 LED,

影响其发光效率的因素有三个方面。首先, 温度从 327 K 升高到 380 K 时, 发光效率降低了 20%, 这是因为温度的升高降低了蓝光芯片的辐射复合效率, 减少了蓝光的发射, 相应的白光发光效率就会下降; 其次, 电流从 50 mA 增加到 350 A 时, 发光效率降低了 35%, 这是因为注入势阱中的电子增多, 使更多的电子扩散出势阱, 发生无辐射复合, 降低了芯片内量子效率, 从而降低了发光效率; 再次是以前人们研究的, 随着电流的增加, LED 的温度升高带来的蓝光芯片的发射波长红移, 而和黄色荧光粉的激发波长不匹配造成的。此外合理的制备封装结构来降低 LED 的工作温度, 可以让 LED 工作的电流大一些。同时我们从理论上得出适当增加势阱宽度可以增加内量子效率。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Chen Ting, Chen Zhizhong, Lin Liang, *et al*. Methods for determining junction temperature of GaN-based white LEDs [ J ]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2006, **27**(3): 407-412 ( in Chinese).
- [ 2 ] Liu Li, Wu Qing, Huang Xian, *et al*. Promoting of the phosphor-based white LED and optical properties [ J ]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2007, **28**(7): 890-894 ( in Chinese).
- [ 3 ] Jiang Dapeng, Zhao Chengju, Hou Fengqin, *et al*. Fabrication and characteristics of white light emitting diode [ J ]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2003, **24**(4): 385-389 ( in Chinese).
- [ 4 ] Lin Liang, Chen Zhizhong, Chen Ting, *et al*. Characteristics of the accelerated aging white LEDs [ J ]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2005, **26**(5): 617-621 ( in Chinese).
- [ 5 ] Chen Mingxiang, Ma Zetao, Liu Sheng. Research on localized induction heating for LED packaging [ J ]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2007, **28**(2): 241-245 ( in Chinese).
- [ 6 ] Jin Shangzhong, Zhang Zaikuan, Hou Mingxian, *et al*. Research on temperature property of illumination white LED [ J ]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2002, **23**(4): 399-402 ( in Chinese).
- [ 7 ] Yu Binhai, Wang Yaohao. Junction temperature and thermal resistance restrict the developing of high power LED [ J ]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2005, **26**(6): 761-766 ( in Chinese).
- [ 8 ] Fang Rongchuan. *Solid-state Spectroscopy* [ M ]. Hefei University of Science and Technology of China Press, 2003, 58-59 ( in Chinese).
- [ 9 ] Grzanka S, Franssen G, Targowski G, *et al*. Role of the electron blocking layer in the low-temperature collapse of electroluminescence in nitride light emitting diodes [ J ]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(10): 103507-1-3
- [ 10 ] Lee Sung-Nam, Cho S Y, Ryu H Y, *et al*. High-power GaN-based blue-white diodes with AlGaIn/GaN multi-quantum barriers [ J ]. *Appl Phys Lett*, 2006, **88**(11): 111101-1-3

## Effect of Temperature and Current on LED Luminous Efficiency

WANG Jian<sup>1,2</sup>, HUANG Xian<sup>1,2</sup>, LU Li<sup>1,2</sup>, WU Qing<sup>1,2</sup>, CHU Ming-hui,

ZHANG Ligong<sup>1</sup>, HOU Feng-qin<sup>1</sup>, LU Xue-yan<sup>1</sup>, ZHAO Cheng-ju<sup>1</sup>,

FAN Yi<sup>1</sup>, LUO Jin-song<sup>1</sup>, JIANG Da-peng<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics

Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract** Recently, people are seeking the lighting source which consumes less energy and has no pollution. Light Emitting Diode (LED) has the advantages over the traditional lamps in the future. The luminous efficiency of blue-light chip and the conversion efficiency of phosphors determine the luminous efficiency of white light LEDs. The thesis experimentally demonstrates luminous efficiency of large-area high-power blue-light LEDs. We study the high power blue LED and discover the influence of temperature and current on luminous efficiency. When operation temperature increases from 327 K to 380 K, the light efficiency of LED decreases 20%. The temperature rising the radiation at the potential well decreases so as to decrease the luminous efficiency. When operation current increases from 50 mA to 350 mA, the luminous efficiency of LED decreases 35%. The current increasing the more nonequilibrium electron diffuse out of the potential well so as to decrease luminous efficiency. Enhancing the heat dissipation efficiency and increasing the width of potential well can improve the luminous efficiency. LED should be working under the limit temperature and the saturated current. LED can work at high current relatively when the thermal dissipation is good. The heating generation will decay the lighting performance. Therefore, the thermal dissipation controls the development of the LED and the goal of our investigation is to increase the efficiency of the thermal dissipation. A good packaging technology is the way to solve the heat dissipation problem. But it is a challenge to develop this technology in the limited space of LED. The purpose of heat dissipating technology for LED is to decrease the working temperature of LED's chip. It is necessary to reduce the thermal resistance of LED package. The efficiency and reliability of solid state lighting devices depends strongly on successful thermal management because the junction temperature of the chip is the prime driver for effective operation. As the power density continues to increase, the integrity of the package electrical and thermal interconnects become extremely important.

**Key words** LED; luminous efficiency; temperature; current; potential well; diffusion