

文章编号: 1000-7032(2009)01-0077-04

白光 LED 极限流明效率的计算

褚明辉¹, 吴庆^{1,2}, 王建^{1,2}, 黄先^{1,2}, 刘学彦¹, 申德振¹, 蒋大鹏^{1*}

(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: 对蓝光芯片加黄色荧光粉制备白光 LED 方法的流明效率进行了理论计算。根据光度学原理, 我们考虑到视觉函数 $V(\lambda)$ 的修正, 以色坐标为 $x=0.325, y=0.332$, 显色指数为 81.5, 色温为 5 914 K 的白光 LED 发光光谱为依据, 计算了白光 LED 流明效率的理论极限: 得出每瓦白光 LED 辐射光功率产生的光通量为 298.7 lm, 白光 LED 发射的总光子数为 2.7×10^{18} 。在理想情况下, 注入一个电子-空穴对产生一个蓝光光子, 设荧光粉的量子效率为 1, 因此, 注入的电子-空穴对数亦等于白光光子数, 进而计算出白光 LED 每辐射 1 W 的光功率所需的电功率为 1.51 W, 上述白光 LED 发光光谱对应的白光 LED 的电-光转换的理论极限流明效率为 197.8 lm/W。

关键词: 白光 LED; 光通量; 流明效率

中图分类号: O482.31; TN312.8

PACC: 3250F; 7855

文献标识码: A

1 引言

半导体照明具有无毒、寿命长、高效节能、工作电压低等诸多优点, 其巨大的市场潜力一直受到各国政府的广泛关注。1993 年, 日本日亚化学公司成功开发出 GaN 蓝色发光二极管(LED), 之后利用蓝光管芯激发 YAG: Ce³⁺ 黄光发光粉, 研发出了白光 LED。这为半导体固态照明时代的到来带来了希望^[1], 随即也引发了一场半导体照明研究的热潮^[2~8]。美国在 2002 年制订了半导体照明发展规划, 在规划中明确提出了未来 20 年半导体照明的发展目标, 预计到 2020 年半导体照明光源的效率达到 200 lm/W。随着相关研究工作的迅速开展, 美国在 2006 年 3 月, 对发展目标进行了调整, 预计到 2010 年半导体照明光源的效率分别达到 119 lm/W (实验室水平)、92 lm/W (商用冷白光)、72 lm/W (商用暖白光)。从两份发展规划的变化来看人们对半导体照明的认识已经逐步深入和理性化。我国对半导体照明工程也给予了高度关注, “国家半导体照明工程协调领导小组”对半导体照明提出了明确的目标: 预期

在“十一五”结束时, 白光 LED 的流明效率将达到 130 lm/W。

作为照明光源, LED 的流明效率是首要关注的指标。许多文章都专门讨论或涉及到 LED 的流明效率^[9,10]。但是, 半导体照明光源流明效率有多大的发展空间, 它的理论极限是多少, 目前还没有系统的计算结果。开展这些方面的研究, 无论从学术上和未来产业发展上都具有十分重要的意义。我们采用已商品化制备白光 LED 的方法, 即蓝光芯片加 YAG 发光粉方法制备了白光 LED, 并利用光度学原理, 对研制的白光 LED 的流明效率进行了理论计算和分析, 给出了用上述方法制备的白光 LED 的极限流明效率的值。

2 理论计算

2.1 流明效率的理论极限

在光度学研究中, 引入了光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 来表示人对不同波长光敏感程度, 流明是照明领域的一个特殊单位, 它主要反映外界光源对人视觉的刺激, 因此, 流明效率的实质就是受光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 修正后的光源能量效率, 光

收稿日期: 2008-10-25; 修订日期: 2008-12-24

基金项目: 褚明辉(1975-), 女, 吉林白城人, 博士研究生, 主要从事白光 LED 的研究。

作者简介: 吉林省科技发展计划重点资助项目(20070317)

E-mail: chumh@ciomp.ac.cn

*: 通讯联系人; E-mail: jdp863@ciomp.ac.cn, Tel: (0431)86176299

源流明效率的计算结果只取决光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 和光源的光谱能量分布。图 1 给出了光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 。从视觉函数上可以看出,人眼最灵敏的波长为 $\lambda = 555 \text{ nm}$,所对应的光谱光视效率函数 $V(555) = 1$ 。

光源的流明效率可以通过式(1)求得:

$$\phi_{\max} = K_m \int_{400}^{700} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda / \int_{400}^{700} \Phi(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中 $\Phi(\lambda)$ 是光源的光谱能量分布, $V(\lambda)$ 是光谱光视效率函数,为明视觉的最大光谱光效率函数。按国际实用温标 IPTS-68 的理论计算值, $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 。

光功率为 1 W 的光源能够产生多少流明的光通量,主要取决于光源的发光光谱和视觉函数。如果光源的发光光谱为理想的单色光,峰值波长为 555 nm,辐射光功率为 1 W,发光光谱可以写成 $\Phi(\lambda) = \delta(555)$,将 $\Phi(\lambda) = \delta(555)$ 代入公式(1),可计算得到该理想单色光光源流明效率的理论极限为 683 lm/W。

图 1 光谱光视觉函数 $V(\lambda)$

Fig. 1 Eye sensitivity function $V(\lambda)$. The eye sensitivity function is the greatest at 555 nm

2.2 每瓦白光 LED 辐射光功率流明效率的理论极限

我们采用各种指标接近标准白光 LED 的发光光谱作为计算依据,白光 LED 的发光光谱示于图 2,其色坐标为 $x = 0.325, y = 0.332$,显色指数为 81.5,色温为 5 914 K,蓝光发射的峰值波长为 465 nm。其归一化的发射光谱如图 2 所示。

白光 LED 的发光光谱用 $\Phi_w(\lambda)$ 表示,其每瓦发射的流明效率可以通过下式求得:

$$\phi_{\max} = 683 \int_{400}^{700} \Phi_w(\lambda) V(\lambda) d\lambda / \int_{400}^{700} \Phi_w(\lambda) d\lambda = 298.7 \text{ lm/W} \quad (2)$$

从计算结果可以看出,每瓦白光 LED 的辐射功率可以产生 298.7 lm 的光通量。也就是说白光 LED 光功率为 1 W 对应的流明效率为 298.7 lm/W。

图 2 归一化的白光 LED 的发射光谱

Fig. 2 The normalized spectrum of the white light (Blue chip + YAG phosphor) LED

2.3 白光 LED 光电转换过程分析

白光 LED 的发光过程与输入的电功率、产生的蓝光功率、转换成白光功率,以及所给出光通量密切相关。其光电转换过程见图 3,即包括电子-空穴对注入、产生蓝光光子、转换成白光光子、给出光通量。

1. 电子-空穴对注入:如果白光 LED 的工作电压为 3.5 V,一对电子-空穴对注入和复合过程能量消耗相当于一个电子从负极流到正极,电压降为 3.5 V,即一对电子-空穴对注入和复合过程能量消耗为 3.5 eV。

2. 产生蓝光光子:假定芯片的外量子效率为 1,注入的电子-空穴的数量应该等于蓝光光子数。

3. 转换成白光光子:假定荧光粉的量子效率为 1,蓝光光子数应该等于白光光子数。

图 3 白光 LED 电-光转换过程

Fig. 3 The electro-light conversion process of white LED

2.4 白光LED电-光转换流明效率理论极限计算

假设上述白光光谱的辐射光功率为1 W,则根据式(1)可计算出该光谱的光通量值为298.7 lm。同时,根据白光LED的发光光谱(图2),我们可以通过公式(3)计算出白光光子数为 N_w

$$N_w = K_w \int_{400}^{700} \frac{\varphi_w(\lambda)\lambda}{hc} d\lambda \quad (3)$$

假设蓝光芯片的外量子效率和荧光粉量子效率均为1,则白光光子数等于蓝光光子数,等于注入的电子-空穴对数,即:

$$N_w = N_b = N_{eh} = 2.7 \times 10^{18}$$

假设白光LED的工作电压为3.5 V,工作电流为 eN_{eh} 。由此,可以计算出产生1 W白光辐射光功率消耗的电功率 W_e :

$$W_e = 3.5 \times 2.7 \times 10^{18} \times 1.6 \times 10^{-19} = 1.51 \text{ W}$$

由此可以得到如下的当量关系:

$$1.51 \text{ W(电功率)} \Rightarrow 1 \text{ W(光功率)} \Rightarrow$$

$$298.7 \text{ lm(辐射光通量)} \quad (4)$$

由当量关系式(4),可以得出每1 W电功率产生的光通量为197.8 lm。也就是说在图2所示的白光LED的发光光谱和白光LED工作电压为3.5 V的条件下,该白光LED光发射的流明效率的理论极限为197.8 lm/W。

3 结 论

对蓝光芯片加黄色荧光粉制备白光LED方法的流明效率进行了理论计算,以色坐标为 $x = 0.325, y = 0.332$,显色指数为81.5,色温为5 914 K的白光LED发光光谱为依据,通过计算得出,每1 W白光LED辐射光功率产生的光通量为298.7 lm/W,在荧光粉的量子效率为1的条件下,注入的电子-空穴对数等于白光光子数,进而计算出白光LED每辐射一瓦的光功率所需的电功率为1.51 W,上述白光LED发光光谱对应的白光LED的电-光转换效率的理论极限为197.8 lm/W。

参 考 文 献:

- [1] Nakamura S, Fasol C. *The Blue Laser Diode* [M]. Berlin: Springer, 1996.
- [2] Bergh Arpad, Craford George, Duggal Anil, et al. The promise and challenge of solid-state lighting [J]. *Phys. Today*, 2001, **54**(12):42-47.
- [3] Luo Yi, Zhang Xianpeng, Han Yanjun, et al. Key technologies for solid state lighting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (激光与光电子学进展), 2007, **44**(3):42-43 (in Chinese).
- [4] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U. S. Department of Energy Solid-State Lighting Research and Development Portfolio, by Lighting Research and Development Building Technologies Program [R]. Washington: Department of Energy, 2006.
- [5] Zhang Guoyou, Zhao Xiaoxia, Meng Qingyu, et al. Preparation and properties of red emitting phosphor-Gd₂Mo₃O₉:Eu³⁺ for white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(1):57-61 (in Chinese).
- [6] Liu Xingren. Phosphors for white LED solid state lighting [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(3):291-301 (in Chinese).
- [7] Yang Yi, Jin Shangzhang, Shen Changyu, et al. Spectral properties of alkaline earth composite silicate phosphors for white-LED [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(1):800-804 (in Chinese).
- [8] Fang Fubo, Wang Yachao, Song Daihui, et al. Spectroscopic analysis of white LED attenuation [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):353-357 (in Chinese).
- [9] Fan Chaoxun. Discussing luminous efficacy of LEDs [J]. *Advanced Display* (现代显示), 2006, **17**(7):11-16 (in Chinese).
- [10] Jiang Dapeng, Liu Xueyan, Yin Chang'an, et al. White light emitting diode matrix and its main parameters [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2001, **22**(3):196-198 (in Chinese).
- [11] Yao Guangqing, Duan Jiefei, Ren Min, et al. Preparation and luminescence of blue light conversion material YAG:Ce [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2001, **22**(Supp.):21-23 (in English).
- [12] Shunsuke Fujita, Satoru V, Akihiko Sakamoto, et al. YAG glass ceramic phosphor for white LED (I):Back ground and

development [J]. *Proc. SPIE*, 2005, **5941**:1-7.

Calculation of Theoretical Limitation of Lumen Efficiency for White LED

CHU Ming-hui¹, WU Qing^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, HUANG Xian^{1,2},
LIU Xue-yan¹, SHEN De-zhen¹, JIANG Da-peng¹

(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: The luminous flux efficiency of white LED combining blue LED chip and YAG: Ce yellow phosphor was calculated theoretically. According to the principle of photometry and considering the modification of the vision function $V(\lambda)$, the theoretical limitation of luminous flux efficiency for white LED was calculated from the emission spectrum of the white LED at the condition of the chromaticity coordinate $x=0.325$, $y=0.322$, the rendering index 81.5, and the color temperature 5 913 K. The result showed that the luminous flux for LW white LED radiation power output is 298.7 lm and the total photons are 2.7×10^{18} . If under ideal conditions, one electron-hole pair injected yields one blue photon and the quantum efficiency of the phosphor equals one, the numbers of electron-hole pair must equal to the numbers of white photons. So LW white LED radiation power output has to consume 1.51 W electric powers and the luminous flux efficiency limitation of electrical to optical conversion for the white LED is 197.8 lm/W at above condition.

Key words: white-emitting LED; luminous flux; luminous efficiency