

# 发光二极管色容差的研究

宋国华<sup>1</sup> 缪建文<sup>2</sup> 纪宪明<sup>1</sup> 张华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南通大学理学院, 江苏 南通 226007; <sup>2</sup>南通大学化学化工学院, 江苏 南通 226007)

**摘要** 对用LED制作的灯具色容差指标进行了理论、实验和数据分析,制作出满足色容差指标的LED灯具。通过相关色温对色容差指标的影响分析,选择5000 K相关色温的LED,有助于满足色容差指标,且兼顾显色性和光效指标;采用峰值波长为(458±1) nm的芯片,选择相应激发波长以及合适发射光谱的荧光粉,控制好荧光粉的使用量,小批量生产出符合色容差要求的LED灯。

**关键词** 应用光学; 白光LED; 色容差; 相关色温; 荧光粉

**中图分类号** TN304

**OCIS** 230.3670 160.4670

**文献标识码** A

## Study of Light Emitting Diodes Color Tolerance

Song Guohua<sup>1</sup> Miao Jianwen<sup>2</sup> Ji Xianming<sup>1</sup> Zhang Hua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China

<sup>2</sup>School of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China

**Abstract** The color tolerance index of the lamp made with LEDs was analyzed by theory experiment and data. The lamp meeting the color tolerance index was fabricated. The 5000 K color temperature LEDs were chosen to fit the index of color tolerance, color rendering and luminous efficacy. The batch production fitting the color tolerance index is carried out through adopting the chip with (458±1) nm peak wavelength and the right dosage of phosphor with the same excitation wavelength as well as right emission spectra.

**Key words** applied optics; white LED; color tolerance; related color temperature; phosphor

## 1 引言

白光LED已引起科技界和产业界的极大关注,成为半导体领域新崛起的研究热点和经济增长点,将取代白炽灯和日光灯,成为照明市场的主导<sup>[1,2]</sup>。白光LED的形成机理有多种,目前最成熟的方法是在蓝光LED芯片上涂敷发黄光的荧光粉,由透射出的蓝光和黄光混合形成白光,其色度指标是照明光源最基本最重要的性能指标之一,主要取决于蓝光芯片和荧光粉的选择与匹配技术,也是制作白光LED封装的核心技术<sup>[3]</sup>。关于白光LED光源色度指标,国内外都展开了大量的研究,美国国家标准照明工作组<sup>[4]</sup>在国际照明委员会(CIE)1931色度图中,白光LED以8个四边形进行分档,赵敏等<sup>[5]</sup>研究了LED波长及相关色温漂移,刘行仁等<sup>[6]</sup>研究了6450 K白光LED色坐标与工作电流的关系。本文研究白光LED色容差指标的实现方法与途径。由于“普通照明用LED模块性能要求”的国家标准正在制定过程中,灯具色容差指标只能参照荧光灯国家标准GB/T10682-2002。为了达到生产出满足色容差要求的灯用LED的目的,本文通过理论、实验和数据分析,选择合适的相关色温、芯片激发波长,以及相应波长的荧光粉和使用量。

## 2 LED相关色温选择

对目前主流白光LED制作方式(蓝光芯片+黄色荧光粉YAG)而言,相关色温可以做到很高,但要做到3500 K及以下相关色温还是比较困难的<sup>[6,7]</sup>,所以LED相关色温只能在6500,5000和4000 K之间选择。

在6500 K时,LED色坐标设为 $x$ 和 $y$ ,色容差取其上限值 $5^{[5]}$ ,则

**收稿日期:** 2009-05-13; **收到修改稿日期:** 2009-06-24

**基金项目:** 江苏省自然科学基金(BK2008183)资助课题。

**作者简介:** 宋国华(1964—),男,硕士,副教授,主要从事光电器件方面的研究。E-mail: songguohua@ntu.edu.cn

$$86 \times 10^4 (x - 0.313)^2 - 2 \times 40 \times 10^4 (x - 0.313)(y - 0.337) + 45 \times 10^4 (y - 0.337)^2 = 5^2, \quad (1)$$

化简为

$$x''^2/0.0048^2 + y''^2/0.0110^2 = 1, \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} x' = x - 0.313, \\ y' = y - 0.337, \end{cases} \quad \begin{cases} y' = y'' \cos \theta + x'' \sin \theta, \\ x' = x'' \cos \theta - y'' \sin \theta, \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\theta = -31^\circ 26'$ , 所以(1)式是中心位于(0.313, 0.337), 短轴为 0.0048, 长轴为 0.0110, 顺时针转动  $31^\circ 26'$  的椭圆。在椭圆内点的色坐标均满足色容差小于 5 的要求, 可以得到 6500 K 相关色温色容差小于 5 的  $x, y$  取值范围, 并根据

$$T = -437 \left( \frac{x - 0.332}{y - 0.1858} \right)^3 + 3601 \left( \frac{x - 0.332}{y - 0.1858} \right)^2 - 6861 \left( \frac{x - 0.332}{y - 0.1858} \right) + 5514.31 \quad (4)$$

计算出相关色温的取值范围。在 5000 K 时, 同样处理, 其简化方程为

$$x''^2/0.0137^2 + y''^2/0.0059^2 = 1 \quad (5)$$

是中心位于(0.346, 0.359), 短轴为 0.0059, 长轴为 0.0137, 逆时针转动  $30^\circ 23'$  的椭圆。同样计算出 5000 K 相关色温的  $x, y$  和相关色温的取值范围, 结果如表 1 所示。

表 1 相关色温 6500 和 5000 K 色容差相关参数比较

Table 1 Comparison on the parameters related to color tolerance of 6500 K and 5000 K color temperatures

Color	Span of $x/\Delta x$	Span of $y/\Delta y$	Span of $T/\Delta T$	Ellipse area $S/10^{-4}$
6500 K	0.3059~0.3201/0.0142	0.3272~0.3478/0.0196	6051~6877/826	1.6494
5000 K	0.3375~0.3546/0.0171	0.3470~0.3710/0.024	4710~5293/583	2.5393

显然 5000 K 的  $\Delta x$  比 6500 K 的  $\Delta x$  大 20.4%,  $\Delta y$  大 22.4%, 椭圆面积大 53.95%, 从生产成品率角度看, 选择 5000 K 更容易实现色容差指标。图 1 为在同一色坐标图上画出 6500, 5000 K 和黑体色轨迹。黑体色轨迹穿过 5000 K 椭圆, 选择 5000 K 相关色温有利于提高显色性指标。

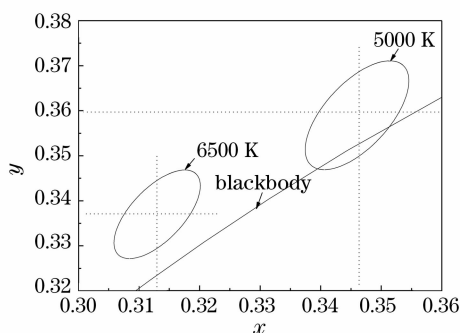


图 1 5000 和 6500 K 色容差色坐标图

Fig. 1 CIE chromaticity diagram of color tolerance of 5000 and 6500 K color temperatures

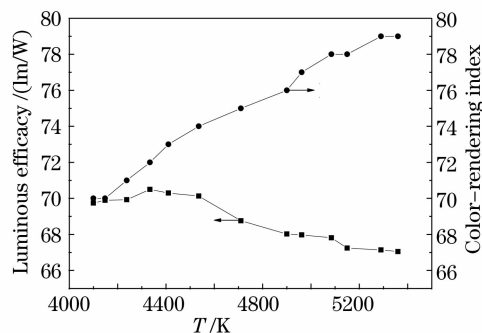


图 2 不同相关色温下的光效和显色指数

Fig. 2 Luminous efficacy and color-rendering index with different color temperatures

从 4000 K 与 5000 K 相关色温满足色容差指标的  $\Delta x, \Delta y$  值及椭圆面积角度看, 差别不大。但用蓝光芯片加 YAG 荧光粉的方法制作的白光 LED, 光效和显色指数这两个指标会有较大变化。制作相关色温约在 4000~5000 K 范围内变化的白光 LED, 测量其光效和显色指数参数, 结果如图 2 所示。可以看出, 当相关色温从 5360 K 下降到 4100 K 时, 光效和显色指数也随之改变, 光效从 67.05 lm/W 上升到 69.74 lm/W, 增加约 4%, 而显色指数则从 79 下降到 70, 下降 11.4%, 目测其颜色明显发黄; 而且当相关色温低到 4200 K 左右时, 荧光粉用量与 5000 K 时相比较, 增加约 33%<sup>[8,9]</sup>。所以选择 5000 K 相关色温满足色容差指标要求的 LED 最为合理。

### 3 荧光粉以及芯片波长的选择

选择两个峰值波长为 456 nm 的芯片和一个峰值波长为 450 nm 的芯片, 以及 3 种具有不同激发光谱和发

射光谱的荧光粉,制作3个成品LED,分别标号为:1#,2#和3#,测量其光谱功率分布函数,结果如图3所示。

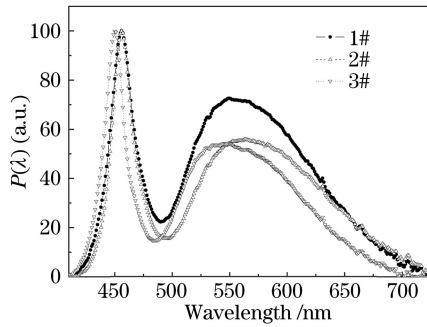


图3 3个成品LED的光谱功率分布函数图

Fig. 3 Spectral power distribution function of three samples

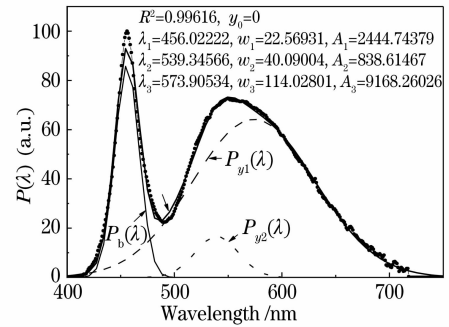


图4 1#样品拟合数据

Fig. 4 Date fitting of sample 1#

1#LED测量得到其芯片峰值波长为456.0 nm,色坐标  $x, y$  为0.3387和0.3692,光谱功率函数  $P(\lambda)$  见图3中实心圆点,拟合数据见图4。拟合函数  $P_n(\lambda)$  为

$$P_n(\lambda) = y_0 + \sum_{i=1}^3 \left( \frac{A_i}{w_i \sqrt{\pi/2}} \right) \exp \left[ -2 \left( \frac{\lambda - \lambda_i}{w_i} \right)^2 \right] = \frac{2444.74}{22.57 \sqrt{\pi/2}} \exp \left[ -2 \left( \frac{\lambda - 456.02}{22.57} \right)^2 \right] + \frac{838.61}{40.09 \sqrt{\pi/2}} \exp \left[ -2 \left( \frac{\lambda - 539.35}{40.09} \right)^2 \right] + \frac{9168.26}{114.03 \sqrt{\pi/2}} \exp \left[ -2 \left( \frac{\lambda - 573.91}{114.03} \right)^2 \right], \quad (6)$$

式中  $i=1$  项对应芯片的发光光谱函数  $P_b(\lambda)$ ,  $i=2, 3$  项的和对应荧光粉的发光光谱函数  $P_y(\lambda) = P_{y1}(\lambda) + P_{y2}(\lambda)$ ,再根据

$$\begin{cases} x_i = \frac{\sum \bar{x}(\lambda) P_i(\lambda) \Delta\lambda}{\sum \bar{x}(\lambda) P_i(\lambda) \Delta\lambda + \sum \bar{y}(\lambda) P_i(\lambda) \Delta\lambda + \sum \bar{z}(\lambda) P_i(\lambda)} \\ y_i = \frac{\sum \bar{y}(\lambda) P_i(\lambda) \Delta\lambda}{\sum \bar{x}(\lambda) P_i(\lambda) \Delta\lambda + \sum \bar{y}(\lambda) P_i(\lambda) \Delta\lambda + \sum \bar{z}(\lambda) P_i(\lambda)} \end{cases} \quad (7)$$

计算出LED成品  $P_n(\lambda)$ , 芯片  $P_b(\lambda)$  和荧光粉  $P_y(\lambda)$  的色坐标值  $x, y, x_b, y_b$  和  $x_y, y_y$ 。式中  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  分别为标准观察者的光谱三刺激值,  $\Delta\lambda$  取值为1 nm, 计算得到的  $x_b, y_b$  分别为0.1479和0.0286,  $x_y, y_y$  分别为0.4141和0.5029,  $x, y$  分别为0.3393和0.3697,  $x, y$  值分别与测量值0.3387和0.3692比较,其绝对误差不大于0.0006。

同样方法处理2#和3#LED样品的光谱功率函数  $P(\lambda)$ , 对于2#样品,数学处理后  $x, y$  分别为0.3424和0.3454,  $x_b, y_b$  分别为0.1476和0.0285,  $x_y, y_y$  分别为0.4321和0.4920, 峰值波长  $\lambda_p = 456.54$  nm, 测量结果:  $\lambda_p = 456$  nm, 误差0.12%,  $x, y$  分别为0.3423和0.3453, 误差0.03%。对于3#样品,数学处理后  $x, y$  分别为0.3124和0.3457,  $x_b, y_b$  分别为0.1549和0.0200,  $x_y, y_y$  分别为0.3924和0.5112, 峰值波长  $\lambda_p = 449.64$  nm, 测量结果:  $\lambda_p = 450.4$  nm, 误差0.17%,  $x, y$  分别为0.3114和0.3448, 误差小于0.4%。

把1#~3#样品的芯片色坐标  $x_b, y_b$  和荧光粉色坐标  $x_y, y_y$ , 以及5000 K椭圆中心坐标  $x_0, y_0$  在图5

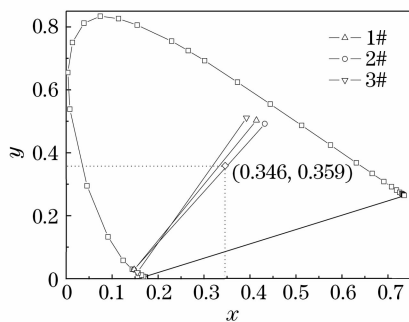


图5 3个样品的  $x_b, y_b$  和  $x_y, y_y$  值

Fig. 5 CIE chromaticity diagram of  $x_b, y_b$  and  $x_y, y_y$  of three samples

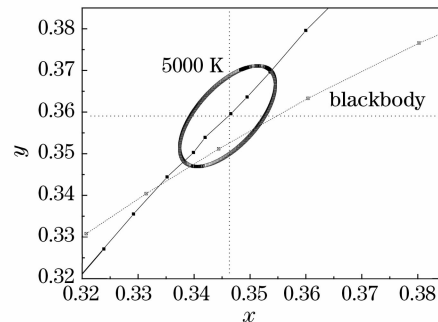


图6 458 nm 波长芯片以及2#荧光粉制作的LED色坐标图

Fig. 6 CIE chromaticity diagram made with 458 nm wavelength chip and 2# phosphor

上标注出来。显然 2# 样品  $x_b, y_b$  与  $x_y, y_y$  的连线与  $x_0, y_0$  距离较短, 选择 2# 样品的荧光粉容易实现色容差指标。另外从图 5 中还可以看出, 2# 样品的  $x_b, y_b$  与  $x_y, y_y$  的连线位于  $x_0, y_0$  的下方, 在选择 2# 样品荧光粉的前提下, 必须调整芯片波长的  $x_b, y_b$  值, 使  $x_b, y_b$  与  $x_y, y_y$  的连线穿过点  $x_0, y_0$ 。

2# 样品的  $x_b, y_b$  分别为 0.1476 和 0.0285, 峰值波长  $\lambda_p = 456 \text{ nm}$ , 必须调整峰值波长或主波长, 使其色坐标上移, 与 2# 样品同型号的荧光粉配合使用。多次实验后取峰值波长为  $(458 \pm 1) \text{ nm}$  的芯片, 与 2# 样品同型号的荧光粉配合使用, 制作若干数量不同相关色温的成品 LED, 测量其  $x, y$  值, 结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 选用峰值波长为  $(458 \pm 1) \text{ nm}$  的芯片, 与 2# 样品同型号的荧光粉配合使用, 荧光粉用量的不同, 改变成品 LED 的相关色温, 不同相关色温成品 LED 的色坐标连线为直线, 直线通过 5000 K 椭圆中心坐标  $x_0, y_0$ 。调整荧光粉的使用量, 使成品 LED 的相关色温为 5000 K<sup>[11,12]</sup>。取 120 个 5000 K 成品 LED, 4 串 30 并组装成 LED 灯, 工作电压和电流分别为 219.9 V 和 72 mA, 用 PMS-50 测量其光电参数, 其光通量为 584.55 lm, 光效为 81.53 lm/W,  $x, y$  分别为 0.3424 和 0.3574, 色容差为 2.56。

## 4 结 论

通过理论和实验分析, 以有助于满足色容差指标, 以及均衡提高显色性和流明效率指标为目的, 选择 5000 K 相关色温的成品 LED; 通过数据分析, 确定荧光粉发射光谱的  $x_y, y_y$  值。通过实验方法确定芯片激发波长, 以及相应激发波长的荧光粉, 使荧光粉的  $x_y, y_y$ , 5000 K 椭圆中心坐标  $x_0, y_0$  以及芯片色坐标  $x_b, y_b$  在一条直线上; 调整荧光粉的使用量, 使成品 LED 的相关色温为 5000 K 左右。把上百个用此法制作的 5000 K 成品 LED 组装成的 LED 灯, 其色容差满足要求。

## 参 考 文 献

- Hao Jingang, Liang Chunjun, Liu Danning *et al.*. LED industrial report[J]. *J. Advanced Display*, 2006, **3**: 8~15  
郝金刚, 梁春军, 刘淡宁等. LED 产业分析报告[J]. 现代显示, 2006, **3**: 8~15
- Zhou Taiming, Zhou Xiang, Cai Weixing. Principle & Design of Light Sources[M] 2nd ed., Shanghai: Fudan University Press, 2006  
周天明, 周 详, 蔡伟新. 光源原理与设计[M]. 第 2 版, 上海: 复旦大学出版社, 2006
- Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei *et al.*. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1777~1782  
吴海彬, 王昌铃, 何素梅等. 涂敷红、绿荧光粉的白光 LED 显色性研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1777~1782
- National Standard Standard Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products[S]. American National Standard Lighting Group. 2008
- Zhao Min, Zhang Wansheng, Xu Lisheng. LED life test method [C]. The Eleventh Conference of the National Seminar on LED Industry and Technology, 2008. 17~38  
赵 敏, 张万生, 徐立生. LED 寿命试验方法的研究[C]. 第十一届全国 LED 产业与技术研讨会, 2008. 17~38
- Liu Xingren, Guo Guanghua, Lin Xiuhua. Driving current dependence of emission spectra and spectro-color characteristics of InGaN based LEDs[J]. *China Illuminating Engineering J.*, 2004, **15**(1): 14~18  
刘行仁, 郭光华, 林秀华. InGaN 蓝光 LED 的发射光谱、色品质与正向电流的关系[J]. 照明工程学报, 2004, **15**(1): 14~18
- Lei Yong, Fan Guanghan, Liao Changjun *et al.*. Research on the thermal property of powerful white LED site LEDs[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(8): 945~957  
雷 勇, 范广涵, 廖常俊等. 功率型白光 LED 的热特性研究[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(8): 945~957
- Song Guohua, Miao Jianwen, Fang Jinghui *et al.*. Measurement of LED thermal resistance based on thermistor[J]. *J. Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(5): 634~637  
宋国华, 缪建文, 方靖淮等. 基于热敏电阻的发光二极管热阻测量[J]. 半导体光电, 2007, **28**(5): 634~637
- Jin Woo Park, Young Bok Yoon, Sang Hyun Shin. Joint structure in high brightness light emitting diode (HB LED) packages [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **441**: 357~361
- Song Xianjie, Xu Chenjie, Liu Xiaogu *et al.*. Study on illuminant spectrum qualifications for collecting tongue condition[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(5): 978~982  
宋贤杰, 徐晨洁, 刘晓谷等. 采集舌象用光源的光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(5): 978~982
- Lianqiao Yang, Sunho Jang, Woongjoon Hwang *et al.*. Thermal analysis of high power GaN-based LEDs with ceramic package [J]. *Thermochimica Acta*, 2007, **455**: 95~99
- Su Da, Wan Demiao. Technical research on heat-release package of high-power LEDs[J]. *J. Semiconductor Technology*, 2007, **32**(9): 742~749