

高显色指数LED合成白光光源的研究

胡奕彬 庄其仁 刘士伟 赖传杜

华侨大学信息科学与工程学院,福建 厦门 361021

摘要 针对目前白光发光二极管(LED)照明灯具显色性不高的问题,基于测色法研究了LED合成白光显色指数的计算模型,根据参与合成的LED光源光谱及其数量,软件编程计算得出合成光源的色温、显色指数等参数。采用优化的遍历范围,将实验测量得到的冷、暖白光及单色LED的光谱导入程序进行模拟计算,得到不同色温下合成光源的显色指数最大值以及所对应的各种LED配比数量。结果表明,暖白光LED与红、绿、蓝LED合成可以获得色温 T_c 介于3500 K~12300 K、显色指数 R_a 介于92.0~97.7的白光;与红、绿、青LED合成可以获得 R_a 介于95.0~97.8的低色温白光(3500 K~4500 K)。冷白光LED与红、绿、青LED合成可以获得 R_a 介于90.9~98.4的高色温白光(8200 K~13000 K)。对理论计算的 $T_c=7803$ K, $R_a=97.29$ 的LED配比进行实际制作,实验测量得到 $T_c=7992$ K, $R_a=97.1$,理论计算结果与实验结果吻合。

关键词 光学器件;发光二极管;显色指数;色温;合成白光

中图分类号 TN312.8 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0323003

Study on LEDs Synthesized High Color Rendering Index White Light Source

Hu Yibin Zhuang Qiren Liu Shiwei Lai Chuandu

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract Targeting poor color rendering property of current white light-emitting diode (LED) lamps, based on the colorimetry method, the calculation model for color rendering index of synthetic white light is studied and the parameters like color temperature and color rendering index of the synthetic LED light source are obtained based on the spectrum and quantity of light sources involved in the synthesis process. By using optimized traversal range, the spectra of cold and warm white light and single-color LEDs are imported into the program for simulating calculation, obtaining the maximum value of color rendering index of the synthesized light source under different color temperatures as well as corresponding matched quantity of various LEDs. The results show that the synthesis with warm white LEDs and red, green and blue LEDs can lead to white light whose color temperature falls in the range of 3500 K~12300 K and color rendering index R_a ranges between 92.0 and 97.7. The synthesis with warm white LEDs and red, green and bluish-green LEDs can lead to low color temperature white light (3500 K~4500 K) whose color rendering index R_a ranges between 95.0 and 97.8. The synthesis with cold white LEDs and red, green and bluish-green LEDs can lead to high color temperature white light (8200 K~13000 K) whose color rendering index R_a ranges between 90.9 and 98.4. An actual fabrication is conducted following the calculated LED amount to produce an LED module with 7803 K color temperature and 97.29 color rendering index. Actual measurement shows that the produced LED module has a color temperature of 7992 K and a color rendering index of 97.1, which is well matched the theoretical results.

Key words optical devices; light-emitting diode; color rendering index; color temperature; synthesized white light

OCIS codes 230.3670; 330.1690; 330.1730

收稿日期: 2015-08-13; 收到修改稿日期: 2015-11-16

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012H0029)、泉州市科技计划(2014Z105)

作者简介: 胡奕彬(1991—),男,硕士研究生,主要从事LED照明方面的研究。E-mail: 646139553@qq.com

导师简介: 庄其仁(1960—),男,教授,主要从事半导体照明技术和光电检测技术等方面的研究。

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

随着发光二极管(LED)技术的不断成熟,白光LED在光效、寿命及成本控制等方面都取得了长足进展,高显色指数白光LED光源在高品质照明和特种照明中有了更广泛的应用^[1-3]。现有白光LED多采用蓝光激发YAG荧光粉,虽然这种LED制作工艺成熟、成本低,但是显色指数并不理想,不能满足优质照明的要求^[4]。近年已有提高白光LED显色指数的相关文献报道。郭自泉等^[5]模拟了固定色温下三基色合成白光,获得了最大显色指数 R_a 为92.6的结果。Ohno等^[6]模拟计算三基色芯片和四基色芯片LED模型得到低色温高显色指数的白光,但是多芯片集成封装为一颗LED结构比较复杂、稳定性差、成本较高。吴海彬等^[7]采用红、绿两种荧光粉组合得到显色指数 R_a 大于90的结果,这种方法的缺点在于常用硫化物红色荧光粉对LED芯片有腐蚀作用,且粉体的合成和调配不易。郑代顺等^[8]将红光LED芯片封装于蓝光LED芯片旁边,共同构成一颗LED,得到了较高的显色指数,但是增加了荧光粉涂覆的难度,同时导致驱动电路更加复杂。因此,研究易于实现、成本低、能满足优质照明需求的高显色指数光源仍然是LED照明技术的研究热点。

本文基于测色法建立LED合成白光显色指数、色温和光视效能的计算模型,研究提高多种LED灯珠合成白光显色指数的方法,导入参与合成的LED光谱,程序计算得出合成光源的色温、显色指数、光视效能等参数,并且对发光单元的配比进行遍历仿真,找出每个色温段合成光源获得最佳显色指数的LED数量配比,并根据模拟结果进行实验对比。该方案易于实现,对提高白光LED显色性有实际参考价值。

2 理论依据

光源的一般显色指数 R_a 越高,光源的显色能力越好^[9-11]。1965年国际照明委员会制定了一种评价光源显色性的方法,简称测色法,经1974年修订,正式推荐在国际上采用。测色法采用14种样品色,其中1~8号样品色选自孟塞尔色标,用于计算一般显色指数,9~14号样品色用于计算特殊颜色显色指数^[12-14]。测色法计算显色指数是基于光源光谱的计算。

LED合成白光光源光谱密度函数 $S(\lambda)$ 可表示为

$$S(\lambda) = g_1 S_1(\lambda) + g_2 S_2(\lambda) + g_3 S_3(\lambda) + \cdots + g_n S_n(\lambda), \quad (1)$$

式中 $S_n(\lambda)$ 和 g_n 分别为第 n 种LED光源的光谱密度函数和对应LED数量。LED合成白光光源的三刺激值 X 、 Y 、 Z 为

$$\begin{cases} X = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 为观察者光谱三刺激值, $k = 100 / \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$ 。LED合成白光光源的色坐标 (x, y) 为

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \end{cases}. \quad (3)$$

LED合成白光光源照明的14个试验色的三刺激值 X_i 、 Y_i 、 Z_i 为

$$\begin{cases} X_i = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \beta_i(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y_i = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \beta_i(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z_i = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \beta_i(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $\beta_i(\lambda)$ 为第*i*号试验色样品的光谱反射系数。LED合成白光光源照明下的14个试验色的色坐标 $(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, 14)$ 为

$$\begin{cases} x_i = \frac{X_i}{X_i + Y_i + Z_i} \\ y_i = \frac{Y_i}{X_i + Y_i + Z_i} \end{cases}. \quad (5)$$

LED合成白光光源的色温 T_c 可用经验公式表示为^[15]

$$T_c = \sum_{n=0}^8 R(n) A^n, \quad (6)$$

式中 $R(0)=9135.111$, $R(1)=-16906.45$, $R(2)=12998.05$, $R(3)=-2784.008$, $R(4)=-954.8603$, $R(5)=217.3433$,
 $R(6)=82.91618$, $R(7)=3.354065$, $R(8)=-5.5733497$; A 为等温线斜率的倒数,

$$A = \frac{x - 0.329}{y - 0.187}. \quad (7)$$

根据(6)式计算得到的LED合成白光光源色温 T_c 来选取参考光源,当色温低于5000 K时用普朗克辐射体作为参考光源,色温高于5000 K时采用标准照明体D(组合日光)作为参考光源。合成光源的色温一旦确定,参考光源的相对能量分布就可以完全确定。LED合成白光光源的特殊显色指数 R_i 定义为

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i, \quad (8)$$

式中 ΔE_i 为LED合成白光光源照明下和参考光源照明下第*i*个色样的色差,

$$\Delta E_i = \left[(W_i - W_n)^2 + (U_i - U_n)^2 + (V_i - V_n)^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中 (W_i, U_i, V_i) 和 (W_n, U_n, V_n) 分别为LED合成白光光源照明下和参考光源照明下试验色的颜色空间坐标。

(9)式中 W_i 、 U_i 、 V_i 的计算公式为

$$\begin{cases} W_i = 25Y_i^{1/3} - 17 \\ U_i = 13W_i(u'_i - u_r), \\ V_i = 13W_i(v'_i - v_r) \end{cases} \quad (10)$$

式中 u_r 、 v_r 为参考光源的色度坐标, u'_i 、 v'_i 为试验色的适应性色位移,

$$\begin{cases} u'_i = \frac{10.872 + 0.404\left(\frac{c_r}{c}\right)c_i - 4\left(\frac{d_r}{d}\right)d_i}{16.518 + 1.481\left(\frac{c_r}{c}\right)c_i - \left(\frac{d_r}{d}\right)d_i} \\ v'_i = \frac{5.520}{16.518 + 1.481\left(\frac{c_r}{c}\right)c_i - \left(\frac{d_r}{d}\right)d_i} \end{cases} \quad (11)$$

(11)式中LED合成白光光源的 c 、 d ,参考光源的 c_r 、 d_r ,LED合成白光光源照明下各颜色样品的 c_i 、 d_i 均可以表示为

$$\begin{cases} c = \frac{4-u-10v}{v} \\ d = \frac{1.708v+0.404-1.481u}{v} \end{cases} \quad (12)$$

式中 u 、 v 为均匀色度坐标,与色坐标 x, y 的关系为

$$\begin{cases} u = \frac{4x}{-2x+12y+3} \\ v = \frac{6y}{-2x+12y+3} \end{cases} \quad (13)$$

为简化计算,(9)式和(10)式中参考光源的色度学参数 W_n 、 U_n 、 V_n 、 u_r 、 v_r 采用奥尔特斯经验公式 $f=b+pm+qm^2$ 计算^[16],其中 f 为 u_r 、 v_r 以及所要计算的参数 U_n 、 V_n 和 W_n , b 、 p 、 q 为对应参数的系数, $m=10^4/T_c$ 。

在照明光源的评价中,常使用的显色指数为一般显色指数 R_a ,其定义为

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i. \quad (14)$$

光视效能 $K_{LER}^{[17]}$ 与显色指数 R_a 是衡量白光LED光源性能的两个重要参量,然而它们又是相互矛盾的,通常获得高显色指数是以降低光视效能为代价^[18],因此在设计高显色指数LED合成白光照明光源时还需要考

虑光视效能的问题。光视效能 K_{LER} 定义为光通量和辐射通量的比值, 表示为

$$K_{LER} = \frac{638 \int_{380}^{780} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) d\lambda}, \quad (15)$$

式中 $S(\lambda)$ 为光源的光谱功率分布, $V(\lambda)$ 为明视觉下的人眼视见函数。

3 仿真与实验方法

选择参与合成白光的 LED 分别为冷白光、暖白光、红色光、绿色光、青色光和蓝色光 6 种 LED 灯珠。采用远方 HAAS-2000 光谱分析系统测得上述各种 LED 灯珠的光谱曲线(图 1)和单颗 LED 的光色参数(表 1)。

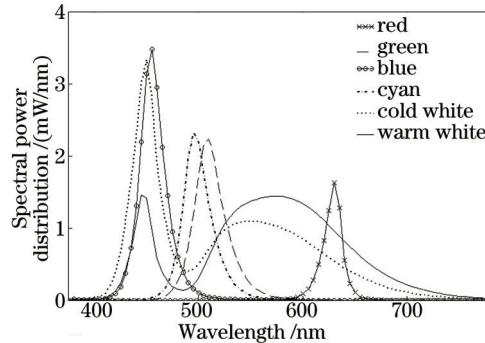


图 1 6 种颜色 LED 灯珠的光谱曲线图

Fig.1 Spectral curves of six color LEDs

表 1 HAAS-2000 光谱分析系统测量得到的 LED 光色参数

Table 1 Colorimetric parameters of LEDs tested by HAAS-2000 spectrum analysis system

| | T_c /K | R_a | Chromaticity coordinate x | Chromaticity coordinate y | Luminous flux /lm | Peak wavelength /nm | FWHM /nm |
|------------|----------|-------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|----------|
| Warm white | 4005 | 69.7 | 0.3849 | 0.3938 | 84.78 | 448 | 21.6 |
| Cold white | 12658 | 80.7 | 0.2777 | 0.2634 | 67.14 | 450 | 26.7 |
| Red | | | 0.6919 | 0.3076 | 7.45 | 631 | 18.1 |
| Green | | | 0.1087 | 0.6472 | 31.39 | 508 | 31 |
| Blue | | | 0.1482 | 0.0382 | 5.07 | 454 | 25 |
| Cyan | | | 0.0728 | 0.4695 | 20.18 | 496 | 28 |

FWHM: full width at half maximum

根据(1)式~(15)式, 基于 Microsoft Visual Studio 软件平台进行编程仿真, 仿真界面如图 2 所示。将测得的光谱数据导入程序, 根据图 1 光谱数据计算上述 6 种 LED 灯珠的光色度参数, 包括色温 T_c 、显色指数 R_a 、色坐标 (x,y) 和光视效能 K_{LER} , 6 种 LED 灯珠的光色度参数仿真结果与 HAAS-2000 光谱分析系统实验测量结果一致(表 1 和表 2)。

表 2 模拟计算得到的 LED 光色参数

Table 2 Colorimetric parameters of LEDs calculated based on simulation

| | T_c /K | R_a | Chromaticity coordinate x | Chromaticity coordinate y | Luminous flux /lm | Peak wavelength /nm | FWHM /nm | K_{LER} /lm/W |
|------------|----------|-------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|----------|-----------------|
| Warm white | 3998 | 69.4 | 0.3848 | 0.3938 | 84.82 | 448 | 21.6 | 348.42 |
| Cold white | 12585 | 80.8 | 0.2775 | 0.2632 | 67.17 | 450 | 26.7 | 264.92 |
| Red | | | 0.6920 | 0.3073 | 7.45 | 631 | 18.1 | 207.41 |
| Green | | | 0.1085 | 0.6480 | 31.38 | 508 | 31 | 371.08 |
| Blue | | | 0.1482 | 0.0380 | 5.07 | 454 | 25 | 48.20 |
| Cyan | | | 0.0727 | 0.4696 | 20.15 | 496 | 28 | 255.29 |

高显色指数LED合成白光照明光源采用三种不同的四色LED组合方案:1)暖白光LED与红、绿、蓝三色LED组合,因暖白光LED光谱中蓝、绿和红光成分较少;2)冷白光LED与红、绿、青三色LED组合,因冷白光LED光谱中青、绿和红光成分较少;3)暖白光LED与红、绿、青三色LED组合,因用青光LED代替蓝光LED可在低色温段获得高显色指数白光。

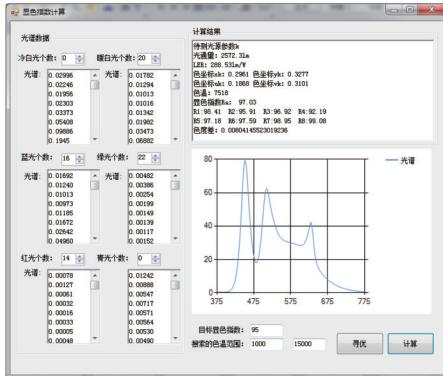


图2 模拟计算程序界面

Fig.2 Interface of simulating calculation program

由于遍历方式计算量巨大,因此优化遍历范围十分重要。在三种组合方案中,先将冷(暖)白光LED的数量设置为20固定不变,其余三种单色LED的数量以显色指数为最大进行选择,即当增加一种单色LED数量时,如果显色指数出现降低,就不再增加该种LED数量,遍历范围选择在此LED数量的一定范围内进行计算。然后由程序计算出每一种组合的色温、显色指数、光视效能等参数。

4 结果与分析

表3为方案1)的模拟计算结果。将暖白光LED与红、绿、蓝三色LED组合,可以看出随着红光LED数量减少,蓝、绿LED数量增加,合成光源的色温不断增加,显色指数 R_a 先增加后降低,并且在色温为9098 K时获得最佳显色指数97.72,此时暖白、红、绿、蓝四色LED的数量配比为20:12:22:21, $K_{LER}=275.67 \text{ lm/W}$ 。在色温为3645 K~12331 K的很大范围内显色指数 R_a 都在92以上,在色温为6159 K~11024 K范围内显色指数 R_a 达到96~97。另外,由表2可以看出蓝光LED的 K_{LER} 较低,仅为48.2 lm/W,所以表3中随着蓝光LED比重的增加,合成光源的色温 T_c 逐渐升高,光视效能 K_{LER} 逐渐降低,因此在进行LED合成白光光源设计时,适当减少蓝光成分不但可以减小对人眼的伤害,而且有益于光视效能。模拟计算结果表明,暖白光LED与红、绿、蓝三色LED组合可以很好地提高暖白光LED的显色指数,并且可以在宽色温范围(3645 K~12331 K)内获得高显色指数白光。

表4为方案2)的模拟计算结果。将冷白光LED与红、绿、青三色LED组合,可以看出随着红光LED数量减少、青色LED数量增加,合成光源的色温不断增加,显色指数 R_a 先增加后降低,在色温为11047 K时获得最佳显色指数98.39,此时四色LED的数量配比为20:9:1:13, K_{LER} 为261.91 lm/W。在色温8370 K~12708 K范围内显色指数在91以上,在色温9683 K~11811 K范围内显色指数 R_a 介于96~98。同时从表4可以看到,在色温大于11230 K的组合中,绿色LED数量为0,此时显色指数 R_a 介于90~98,说明冷白光LED、红光LED、青色光LED三色合成同样可以获得高显色指数白光^[19]。模拟计算结果表明,冷白光LED与红、绿、青三色LED组合可以获得高色温(8187 K~12932 K)高显色指数白光。

表5为方案3)的模拟计算结果。将暖白光LED与红、绿、青三色LED组合,可以看出随着红光LED数量减少、绿色和青色LED数量增加,合成光源的色温不断增加,显色指数 R_a 先升高后降低,在色温为3973 K时获得最佳显色指数97.82,此时四色LED的数量配比为20:22:0:12, K_{LER} 为318.19 lm/W。在色温3291 K~4805 K范围内显色指数 R_a 在90以上,在色温3699 K~4304 K范围内显色指数 R_a 介于96~97。模拟计算结果表明,暖白光LED与红、绿、青三色LED组合可以在低色温范围(3699 K~4304 K)内获得高显色指数白光。同时从表5还可以看出,在色温低于4118 K的组合中,绿色LED数量为0,此时显色指数 R_a 介于87~97,表明暖白光LED、红光LED、青色光LED三色合成也可以获得低色温高显色指数白光。

表3 暖白光LED与红绿蓝三色LED组合后的计算结果(3000 K~12000 K)

Table 3 Calculated values of warm white LEDs mixed with red, green, blue LEDs (3000 K~12000 K)

| Number of LEDs | | | | T_c /K | R_a | K_{LER} /(lm/W) |
|----------------|-----|-------|------|----------|-------|-------------------|
| Warm white | Red | Green | Blue | | | |
| 20 | 24 | 0 | 0 | 3089 | 85.72 | 327.21 |
| 20 | 24 | 1 | 0 | 3172 | 86.89 | 327.84 |
| 20 | 24 | 0 | 3 | 3288 | 88.79 | 312.65 |
| 20 | 24 | 2 | 3 | 3471 | 90.66 | 314.24 |
| 20 | 24 | 3 | 4 | 3645 | 92.11 | 310.62 |
| 20 | 24 | 4 | 4 | 3735 | 92.65 | 311.41 |
| 20 | 24 | 7 | 4 | 3997 | 93.58 | 313.65 |
| 20 | 24 | 10 | 3 | 4146 | 94.14 | 319.82 |
| 20 | 24 | 12 | 3 | 4297 | 94.48 | 321.05 |
| 20 | 22 | 12 | 4 | 4477 | 94.72 | 318.16 |
| 20 | 22 | 13 | 5 | 4658 | 94.98 | 314.87 |
| 20 | 20 | 14 | 6 | 4939 | 95.34 | 312.77 |
| 20 | 20 | 18 | 7 | 5340 | 95.37 | 311.74 |
| 20 | 18 | 19 | 9 | 5784 | 95.81 | 306.42 |
| 20 | 16 | 18 | 11 | 6159 | 96.20 | 299.94 |
| 20 | 15 | 18 | 13 | 6590 | 96.45 | 293.95 |
| 20 | 14 | 19 | 13 | 6720 | 96.49 | 295.11 |
| 20 | 14 | 19 | 14 | 6923 | 96.78 | 292.04 |
| 20 | 14 | 18 | 15 | 7088 | 96.55 | 288.22 |
| 20 | 14 | 20 | 15 | 7194 | 96.99 | 289.84 |
| 20 | 14 | 21 | 15 | 7242 | 96.91 | 290.63 |
| 20 | 14 | 21 | 15 | 7471 | 97.16 | 287.74 |
| 20 | 14 | 22 | 16 | 7518 | 97.03 | 288.53 |
| 20 | 14 | 20 | 17 | 7673 | 96.86 | 284.10 |
| 20 | 13 | 20 | 17 | 7756 | 97.28 | 284.41 |
| 20 | 13 | 21 | 17 | 7803 | 97.29 | 285.24 |
| 20 | 13 | 21 | 18 | 8067 | 97.44 | 282.47 |
| 20 | 13 | 22 | 19 | 8384 | 97.51 | 280.60 |
| 20 | 13 | 22 | 20 | 8680 | 97.42 | 277.98 |
| 20 | 12 | 22 | 20 | 8779 | 97.67 | 278.25 |
| 20 | 12 | 22 | 21 | 9098 | 97.72 | 275.67 |
| 20 | 13 | 24 | 22 | 9372 | 97.41 | 274.61 |
| 20 | 11 | 22 | 22 | 9567 | 97.76 | 273.39 |
| 20 | 12 | 24 | 23 | 9835 | 97.61 | 272.42 |
| 20 | 9 | 22 | 23 | 10195 | 97.28 | 271.39 |
| 20 | 10 | 22 | 24 | 10499 | 97.20 | 268.71 |
| 20 | 8 | 21 | 24 | 10783 | 97.18 | 268.26 |
| 20 | 7 | 17 | 24 | 11024 | 96.25 | 264.67 |
| 20 | 5 | 18 | 24 | 11324 | 95.72 | 266.11 |
| 20 | 4 | 15 | 24 | 11631 | 94.89 | 263.33 |
| 20 | 3 | 13 | 24 | 11920 | 93.90 | 261.44 |
| 20 | 2 | 12 | 24 | 12211 | 93.11 | 260.57 |
| 20 | 1 | 13 | 24 | 12331 | 92.77 | 261.90 |
| 20 | 1 | 10 | 24 | 12614 | 91.84 | 258.55 |

光 学 学 报

表4 冷白光LED与红绿青三色LED组合后计算结果(7000 K~13000 K)

Table 4 Calculated values of cold white LEDs mixed with red, green, cyan LEDs (7000 K~13000 K)

| Number of LEDs | | | | T_c /K | R_a | K_{LER} /(lm/W) |
|----------------|-----|-------|------|----------|-------|-------------------|
| Cold white | Red | Green | Cyan | | | |
| 20 | 24 | 4 | 0 | 6977 | 77.48 | 262.74 |
| 20 | 24 | 9 | 0 | 7427 | 81.96 | 269.59 |
| 20 | 23 | 11 | 0 | 7694 | 84.78 | 272.43 |
| 20 | 23 | 16 | 0 | 7986 | 88.69 | 278.18 |
| 20 | 22 | 18 | 0 | 8187 | 90.22 | 280.66 |
| 20 | 21 | 18 | 0 | 8297 | 90.87 | 281.02 |
| 20 | 20 | 17 | 0 | 8370 | 91.22 | 280.33 |
| 20 | 20 | 18 | 1 | 8486 | 91.76 | 280.69 |
| 20 | 18 | 15 | 2 | 8697 | 92.65 | 278.36 |
| 20 | 17 | 14 | 3 | 8880 | 93.35 | 277.35 |
| 20 | 16 | 14 | 4 | 9094 | 94.08 | 277.46 |
| 20 | 15 | 12 | 5 | 9262 | 94.74 | 275.31 |
| 20 | 14 | 10 | 6 | 9457 | 95.38 | 273.09 |
| 20 | 13 | 9 | 7 | 9683 | 96.07 | 272.01 |
| 20 | 12 | 8 | 7 | 9848 | 96.39 | 271.11 |
| 20 | 12 | 5 | 10 | 10099 | 97.01 | 266.77 |
| 20 | 11 | 6 | 9 | 10190 | 97.37 | 268.55 |
| 20 | 11 | 5 | 10 | 10286 | 97.72 | 267.09 |
| 20 | 11 | 4 | 11 | 10386 | 97.79 | 265.63 |
| 20 | 10 | 4 | 10 | 10495 | 97.94 | 266.08 |
| 20 | 10 | 3 | 11 | 10603 | 98.24 | 264.59 |
| 20 | 9 | 2 | 11 | 10830 | 98.18 | 263.51 |
| 20 | 9 | 1 | 13 | 11047 | 98.39 | 261.91 |
| 20 | 8 | 0 | 12 | 11230 | 98.00 | 260.84 |
| 20 | 8 | 0 | 14 | 11401 | 98.14 | 260.70 |
| 20 | 7 | 0 | 14 | 11632 | 97.24 | 261.00 |
| 20 | 6 | 0 | 13 | 11811 | 96.40 | 261.38 |
| 20 | 5 | 0 | 13 | 12053 | 95.00 | 261.69 |
| 20 | 5 | 0 | 15 | 12202 | 93.99 | 261.53 |
| 20 | 4 | 0 | 15 | 12459 | 92.55 | 261.83 |
| 20 | 3 | 0 | 12 | 12518 | 92.32 | 262.41 |
| 20 | 3 | 0 | 15 | 12708 | 91.05 | 262.14 |
| 20 | 2 | 0 | 14 | 12932 | 90.08 | 262.54 |

表5 暖白光LED与红绿青三色LED组合后计算结果(3100 K~4800 K)

Table 5 Calculated values of warm white LEDs mixed with red, green, cyan LEDs (3100 K~4800 K)

| Number of LEDs | | | | T_c /K | R_a | K_{LER} /(lm/W) |
|----------------|-----|-------|------|----------|-------|-------------------|
| Warm white | Red | Green | Cyan | | | |
| 20 | 24 | 0 | 1 | 3155 | 87.24 | 326.23 |
| 20 | 24 | 0 | 3 | 3291 | 90.09 | 324.35 |
| 20 | 24 | 0 | 4 | 3359 | 91.40 | 323.45 |
| 20 | 24 | 0 | 6 | 3495 | 93.83 | 321.71 |
| 20 | 24 | 0 | 7 | 3562 | 94.93 | 320.88 |
| 20 | 24 | 0 | 9 | 3699 | 96.79 | 319.27 |
| 20 | 24 | 0 | 10 | 3766 | 97.32 | 318.49 |
| 20 | 23 | 0 | 11 | 3869 | 97.69 | 318.34 |
| 20 | 22 | 0 | 12 | 3973 | 97.82 | 318.19 |
| 20 | 21 | 0 | 12 | 4011 | 97.75 | 318.80 |
| 20 | 20 | 0 | 13 | 4118 | 97.48 | 318.64 |
| 20 | 20 | 2 | 12 | 4205 | 97.09 | 320.71 |
| 20 | 19 | 1 | 14 | 4304 | 96.47 | 319.15 |
| 20 | 19 | 5 | 11 | 4404 | 95.74 | 323.93 |
| 20 | 20 | 7 | 11 | 4507 | 95.02 | 324.47 |
| 20 | 19 | 7 | 12 | 4606 | 94.17 | 324.29 |
| 20 | 18 | 6 | 14 | 4704 | 93.27 | 322.80 |
| 20 | 19 | 10 | 12 | 4805 | 92.27 | 325.91 |

图3为上述三种方案色温与最高显色指数的关系曲线。由图3可以看出相比于方案2)和方案3),方案1)暖白光LED与红绿蓝三色LED合成获得高显色指数白光的色温范围更广。方案2)与方案3)分别在高色温和低色温范围获得很高的显色指数 R_a (高于95)。图4为上述三种方案色温 T_c 与光视效能的关系曲线。由图4可以看出,低色温合成白光的 K_{LER} 普遍高于高色温合成白光,这是由于相比低色温白光,高色温白光中的蓝光成分较多,而蓝光的增多会降低 K_{LER} 。由图3和图4可以看出,方案3)暖白和红绿青LED的组合可以弥补方案1)暖白光和红绿蓝LED的组合在低色温范围显色性和光效的不足。在高色温段,方案2)的光效与方案1)相差不多,但是显色指数优于方案1)。

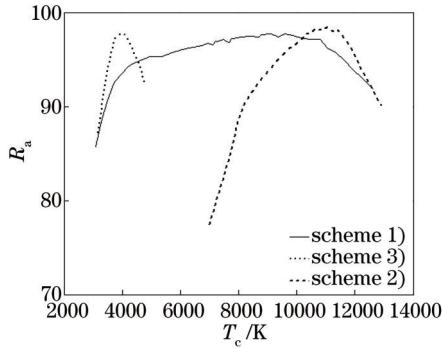


图3 三种组合方案色温与显色指数的关系

Fig.3 Variation in color rendering index of three combination schemes with color temperature

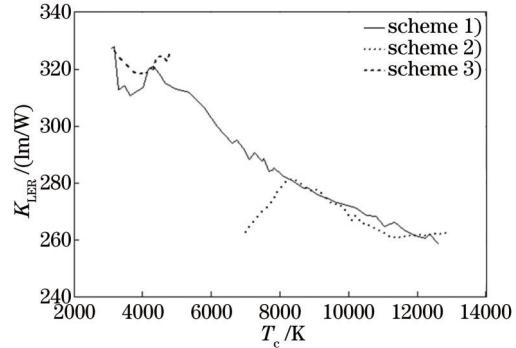
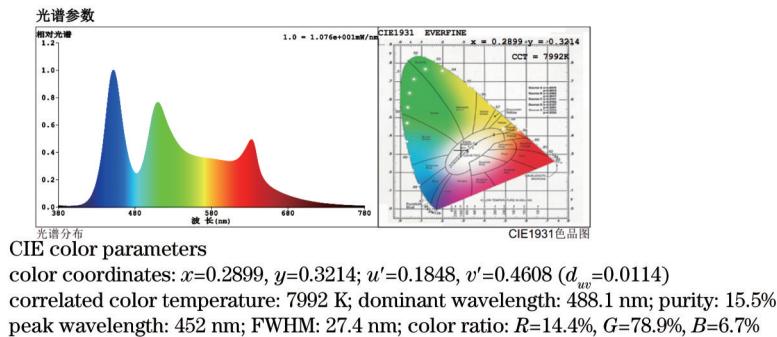


图4 三种组合方案色温与光视效能的关系

Fig.4 Variation in luminous efficiency of three combination schemes with color temperature

为验证模拟计算结果的正确性,在色温7000 K附近,选择方案1)制作一款组合光源模块,暖白、红、绿、蓝4种LED的数量比例为20:13:21:17,模拟计算得到的色温 T_c 和显色指数 R_a 分别为7803 K和97.29。实验中将符合该数量配比的4种小功率LED灯珠组合成一个光源模块,即20个暖白光LED,13个红色LED,21个绿色LED,17个蓝色LED。图5为HAAS-2000光谱分析系统实际测得的组合光源模块光色度参数,其色温和显色指数分别为7992 K和97.1,与模拟计算结果十分接近。在实际应用中,还需要合理排布不同颜色的LED或者进行二次光学设计,使4种LED灯珠发出的光线混合均匀。通过模拟计算发现,适当调整个别颜色LED数量并不会使混合光显色指数有太大变化,但是可以使LED数量比例出现新的公因子,从而降低模块所需要的LED数量,提高实际应用的灵活性。



$R_a=97.1$
 $R_1=98, R_2=97, R_3=97, R_4=93, R_5=97, R_6=98, R_7=98$
 $R_8=99, R_9=99, R_{10}=95, R_{11}=83, R_{12}=78, R_{13}=96, R_{14}=98, R_{15}=96$

图5 实测组合LED光源模块参数

Fig.5 Measured colorimetric parameters of LED module

5 结论

研究了暖白光LED与红、绿、蓝LED组合,冷白光LED与红、绿、青LED组合,暖白光LED与红、绿、青LED组合三种不同的组合方案,得到高显色指数的合成白光。模拟计算结果表明方案1)暖白光LED与红绿

蓝LED通过合理组合,在3645 K~12331 K很宽的色温范围内显色指数 R_a 都在92以上,最高显色指数达到97.71;方案2)冷白光LED与红绿青LED通过合理组合,在高色温8370 K~12708 K范围内显色指数 R_a 都达到92以上,最高显色指数达98.39;方案3)暖白光LED与红绿青LED通过合理组合,在低色温3291 K~4805 K范围内显色指数 R_a 都在90以上,最高显色指数达97.82。通过实际制作组合光源模块,验证了模拟计算合成白光光源LED数量比例的正确性,说明提出的理论计算方法可用于指导实际工程设计:方案1)可用于指导设计宽色温可调高显色性LED合成白光照明光源,方案2)可用于指导设计高色温高显色性LED合成白光照明光源,方案3)可用于指导设计低色温高显色性LED合成白光照明光源。

参 考 文 献

- 1 Yin Luqiao, Yang Weiqiao, Li Shuzhi, *et al.*. Dynamic color temperature white lighting source based on red green and blue light emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523004.
- 2 Jang H S, Jeon D Y. White light emission from blue and near ultraviolet light-emitting diodes precoated with a Sr₃SiO₅:Ce³⁺, Li⁺phosphor [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(23): 3444–3446.
- 3 Bai Shengmao, Wang Jing, Miao Hongli, *et al.*. Luminescence properties of the Y_{3-x-y}PrGd_xAl_yO₁₂:Ce³⁺ phosphors for white light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1402–1405.
- 4 Xu Daisheng, Chen Xiao, Zhu Xiang, *et al.*. A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004.
- 5 Guo Ziquan, Gao Yulin, Lü Yijun, *et al.*. Spectrum optimization of tri-color white LEDs at fixed correlated color temperature[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(7): 992–996.
- 6 Ohno Y. Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra[C]. SPIE, 2004, 5530: 88–98.
- 7 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1777–1781.
- 8 Zheng Daishun, Qian Keyuan, Luo Yi. Fabrication and luminescence characteristics studies of the high-power white LEDs with low T_c and high R_a [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, 17(12): 1422–1426.
- 9 Cao Yujie, Jin Shangzhong, Cen Songyuan. Design for LED lamps with high color rendering index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222002.
- 10 Yu Chunyu, Jin Peng, Zhou Qifeng. Optimizing color rendering for mixed-color white light LED[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1316–1319.
- 11 Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Chen Yingcong. Research on color mixing based on RGBW-LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0923004.
- 12 International Commission on Illumination. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources[S]. CIE 13, 3:1995, 1995.
- 13 International Commission on Illumination. Colour rendering(TC1-33 closing remarks)[S]. CIE 135/2:1999, 1999.
- 14 Mirhosseini R, Schubert M F, Chhajed S, *et al.*. Improved color rendering and luminous efficacy in phosphor-converted white light-emitting diodes by use of dual-blue emitting active regions[J]. *Opt Express*, 2009, 17(13): 10806–10813.
- 15 Huang Zhiwei, Chen Jinkai, Zheng Wei, *et al.*. Calculating empirical formula of source color temperature T by orthogonal polynomial regression combined with least-square fit[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1995, 15(5): 107–113.
- 黄志伟, 陈金铠, 郑蔚, 等. 正交多项式最小二乘曲线拟合法求光源色温的经验公式[J]. 光谱学与光谱分析, 1995, 15(5): 107–

113.

- 16 Yao Qi. Spectral efficiency performance optimization research on three-chips of LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 083003.
姚 其. 三芯片 LED 光谱效率性能优化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 083003.
- 17 Tan Li, Liu Yuling, Yu Feihong. Method for the computing of color-rendering index[J]. *Optical Instruments*, 2004, 26(4): 41-44.
谭 力, 刘玉玲, 余飞鸿. 光源显色指数的计算方法研究[J]. 光学仪器, 2004, 26(4): 41-44.
- 18 Dai Shuchun, Guo Ziquan, Lü Yijun, et al.. Spectrum optimization of bi-color and tri-color phosphor-converted white LEDs in neutral correlated color temperature system[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(8): 873-878.
戴树春, 郭自泉, 吕毅军, 等. 中性色温下两基色、三基色荧光粉转换白光 LED 的光谱优化[J]. 发光学报, 2012, 33(8): 873-878.
- 19 Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Shang Jun, et al.. A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0223001.
宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0223001.

栏目编辑: 张 雁