

# 超高显色指数和色温可调的LED白光照明光源研究

湛江波<sup>1</sup> 余建华<sup>2</sup> 高亚飞<sup>1</sup> 张翼扬<sup>1</sup> 陆秀炎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060

<sup>2</sup>深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060

**摘要** 采用Ohno等提出的发光二极管(LED)发光光谱数学模型,计算LED芯片的发光光谱,并基于光谱叠加性原理,研究多芯片光源的混光特性。实验中用蓝光LED激发涂覆其上的绿橙双色荧光粉获得暖白光,与红、青、蓝三种LED光源混光。通过控制模块发送指令到脉宽调制(PWM)驱动电路分别调节各个LED的驱动电流占空比,从而控制4种LED的光通量及其配比,实现色温在2700 K~6500 K范围内连续可调。在宽色温范围内,获得超高的显色指数, Ra在95~98之间,全部特殊显色指数(R1~R15)都在90以上,辐射发光效率(LER)在286~336 lm/W之间的白光LED光源。实验测量与计算模拟结果的一致性很好。

**关键词** 光电子学; 发光二极管; 白光照明; 显色指数; 色温可调; 辐射发光效率

中图分类号 TN312+.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1023002

## Study on Tunable Color Temperature White LED Light Source with Ultra-High Color Rendering Index

Chen Jiangbo<sup>1</sup> Yu Jianhua<sup>2</sup> Gao Yafei<sup>1</sup> Zhang Yiyang<sup>1</sup> Lu Xiuyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

<sup>2</sup>College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

**Abstract** The emission spectrum of light emitting diode (LED) are calculated by using the LED spectral model of Ohno, and then the spectral combination of multi-LEDs has been investigated theoretically and experimentally. In the experiment, the warm white light, which is obtained by blue LED die exciting green and orange phosphor, and red, cyan, blue LED light are mixed. By respectively controlling the duty ratio of the pulse width modulation (PWM) signals, the drive currents and luminous flux of each LED can be adjusted. A mixed white light source with ultra-high color rendering index has been realized for the first time, whose color temperature can be tunable within the range of 2700 K to 6500 K, Ra is between 95 to 98, all special CRIs (R1~R15) are more than 90, and luminous efficacy of radiation (LER) is between 286 lm/W to 336 lm/W. The consistency of experimental measurements and theoretical simulation are very well.

**Key words** optoelectronics; light emitting diode; white lighting; color rendering index; tunable color temperature; luminous efficacy of radiation

**OCIS codes** 230.0250; 230.3670; 230.6080; 330.1715; 330.1730

## 1 引言

白光发光二极管(LED)以其高光效、长寿命、高可靠性等特点,正逐步成为主流的照明光源<sup>[1-2]</sup>。目前,市面上大功率白光LED采用的是蓝光芯片激发单一黄色荧光粉,但其有色温单一、显色性差等缺点<sup>[3-5]</sup>。然而在许多应用场合,人们不仅要求光源的色温可调,而且要有高的显色指数,特别是在一些特殊的场合,如摄

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-05-28

基金项目: 广东省产学研重点基金(2011A090200081)、深圳市基础研究基金(JCYJ20140418095735617)

作者简介: 湛江波(1992—),男,硕士研究生,主要从事LED照明设计方面的研究。E-mail: 709644749@qq.com

导师简介: 余建华(1956—),男,博士,教授,主要从事光电照明与显示、激光技术等方面的研究。

E-mail: jyu@szu.edu.cn(通信联系人)

影摄像、博物馆、展览馆、医院、美术室和商品展示等<sup>[6]</sup>。

光源色温对人的昼夜生物规律有着重要的影响,根据人们所处的环境,可以通过改变光源色温,创造出最适宜的工作和生活的光环境<sup>[7-8]</sup>。众所周知,自然光是大自然赐给人类最好的光源,它具有非常好的显色性和多种不同的色温<sup>[9]</sup>,点亮人类的生活。但是,如何能够获得像自然光同样照明品质的人造光源,一直是近百年来人类的梦想。截至目前,人类电光源从白炽灯到节能灯,再到现在的LED灯,唯有白炽灯在显色特性方面能够接近自然光。然而白炽灯只有固定的色温,且耗能低效,即将被淘汰。

如何能够获得像自然光那样的新型LED光源,它既能够在较宽的范围内色温连续可调,又能够在该范围内保持超高的特殊显色指数(R1~R15都在90以上),这将是人类照明光源的一次突破。目前,实现色温可调的白光LED的方法主要有两种:1)采用暖色加冷色白光LED混色来实现色温可调,其缺点是白光的显色指数不高;2)采用红绿蓝LED混色来实现色温可调,其缺点是白光的光效和显色指数都不高<sup>[10-11]</sup>。

为了实现白光LED光源的色温可调且有高的显色指数,目前人们已提出了多种LED混光方案:采用红黄绿蓝(R/Y/G/B)四色混光<sup>[12]</sup>,和蓝红暖白(B/R/PC)三色混光<sup>[13]</sup>等。虽然这些方案实现了色温在2700 K~6500 K内可调,一般显色指数Ra和R9大于90,但都无法做到全部显色指数R1~R15大于90。

采用Ohno提出的发光光谱数学模型<sup>[14]</sup>,计算LED芯片的发光光谱,并基于光谱叠加性原理,计算模拟多芯片光源的混光特性。采用暖白光,与红、青、蓝LED光源混光,通过脉宽调制(PWM)调光技术,实验得到了在2700 K~6500 K范围内色温可调,一般显色指数(Ra)在95~99之间,且特殊显色指数(R1~R15)都在90以上的白光LED光源。

## 2 原理与计算模拟

### 2.1 理论基础

能正确还原物体本来颜色的能力叫做显色性,通常用显色指数(CRI)来表示光源的显色性<sup>[15-16]</sup>。光源的显色指数(最大值为100)愈高,其显色性能愈好,一般认为太阳光的显色指数为100。CRI的计算是通过选定15种颜色样品,测量在标准光源和待测光源下样品的色差。光源对某一样品的特殊显色指数为<sup>[17-18]</sup>

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i, \quad (i=1, \dots, 15), \quad (1)$$

式中,  $\Delta E_i$  为某一标准样品在待测光源和标准光源下的色差。

一般显色指数  $R_a$  是指光源对前8个颜色样品的平均显色指数,其表达式如下<sup>[17-18]</sup>:

$$R_a = \sum_{i=1}^8 R_i / 8. \quad (2)$$

当某种光源的色品和某一温度下的黑体色品相同时,将黑体的绝对温度称为此光源的色温。色温的计算公式如下:

$$T_c = -437 n^3 + 3601 n^2 - 6861 n + 5514.31, \quad (3)$$

式中  $n = (x - 0.3320)/(y - 0.1858)$ ,  $x, y$  为 CIE  $x-y$  的色品坐标。

光源的光谱功率分布(SPD)是符合线性叠加原理的,多色光混合后白光的相对光谱功率分布函数为

$$S(\lambda) = k_1 S_1(\lambda) + k_2 S_2(\lambda) + \dots + k_n S_n(\lambda), \quad (4)$$

式中  $k_n$ 、 $S_n(\lambda)$  分别为参与混光的光功率配比和相对光谱功率分布函数。

光源的色温和显色指数是由光源的相对光谱功率分布决定的,所以知道白光LED的相对光谱功率函数之后,可以计算出光源的特殊显色指数和色温。

光源的光效(LE)表示光源将电能转化为光能的能力,表达式为<sup>[17]</sup>

$$\eta_e = \eta_c \cdot K, \quad (5)$$

式中  $\eta_c$  为电功率转换为光功率的效率,  $K$  为光源的辐射发光效率(LER),其表达式为<sup>[14,17]</sup>

$$K = \frac{K_m \int_{\lambda} V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

式中  $K_m$  的值为 618 lm/W,  $V(\lambda)$  为视见函数。

### 2.2 计算模拟

为了有效地模拟LED光源的光谱,选用 Ohno 等提出的数学模型,经实验证明,模拟出的光谱与单芯片LED的实际发光光谱十分吻合,以峰值波长为 445 nm 的蓝光 LED 为例,模拟光谱与实际光谱的比较如图 1 所示。模型的表达式为<sup>[14,19]</sup>

$$S(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = [g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) + 2g^5(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5})]/3, \quad (7)$$

式中,  $g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / \Delta\lambda_{0.5}^2]$ ,  $\lambda_0$  为峰值波长,  $\Delta\lambda_{0.5}$  为光谱半峰全宽。

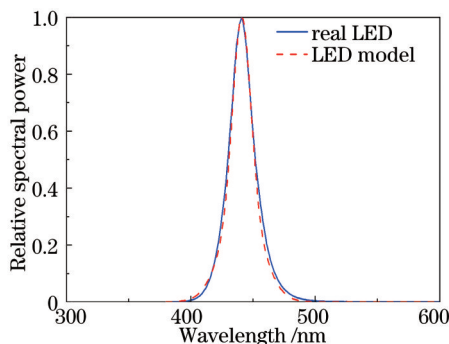


图 1 LED 的模拟光谱与实际光谱

Fig.1 SPD of a LED model and a real LED

实验中采用蓝光 LED 激发绿橙双色荧光粉获得暖白光(B\_G\_O),与红(R)、青(Cy)、蓝光(B)LED 进行混光。各 LED 和荧光粉的参数如表 1 所示。4 种 LED 的模拟光谱如图 2 所示。4 种 LED 在 CIE x-y 色品图上的位置如图 3 所示,从图中可以看出,光源的色域很宽,包含普朗克轨迹很长一段范围,为混合白光光源实现高显色指数、2700 K~6500 K 内色温可调创造了条件。

表 1 LED 和荧光粉的参数

Table 1 Parameters of the LEDs and phosphors

LED and phosphor	$\lambda_0/\text{nm}$	$\Delta\lambda_{0.5}/\text{nm}$
Blue LED	445	25
Cyan LED	495	35
Red LED	632	20
Green phosphor	535	80
Orange phosphor	585	80

从表 1 中可以看到,蓝、青、红 3 种 LED 的峰值波长分别为 445、495 和 632 nm;绿色和橙色荧光粉发射光谱的峰值波长分别为 535 和 585 nm。

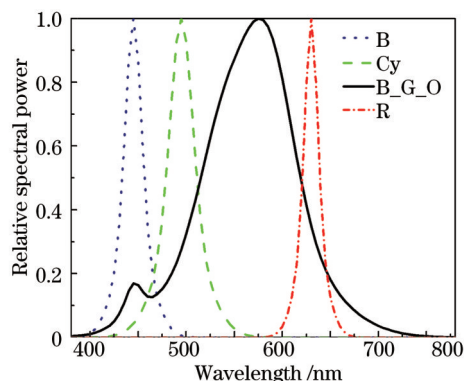


图 2 LED(B/Cy/R/B\_G\_O)的模拟相对光谱功率

Fig.2 Simulative relative SPD of B/Cy/R/B\_G\_O LEDs

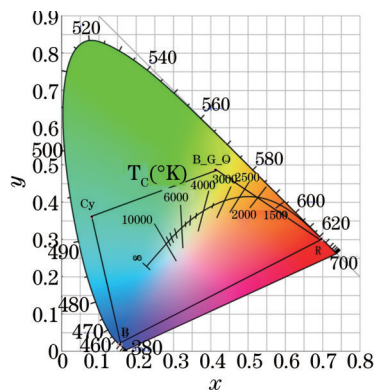


图 3 CIE x-y 色品图

Fig.3 CIE x-y chromaticity diagram

基于光谱叠加性原理,导入 B/Cy/R/B\_G\_O 的相对光谱功率分布,根据(4)式对 Kn 赋值,以 Matlab 软件计算模拟,得到混合白光光源的相对功率光谱分布数据和色度参数:特殊显色指数 R1~R15 的值、一般显色指数、色温值和辐射发光效率等(见表 2),所对应的混合白光光谱如图 4 所示。在进行 Matlab 模拟获得高显色

指数、色温可调的白光LED光源时,可以得到多组参与混色的4种LED的光功率配比,此时,选择LER最大值对应的光功率配比,为最优光功率配比方案。

表2 色温在2700 K~6500 K范围内R1~R15的计算模拟值

Table 2 Value of R1 to R15 of simulation result at CCTs of 2700 K to 6500 K

CCT/K	2700	3000	3500	4000	4500	5000	5700	6500
LER /(lm/W)	347	344	337	324	312	304	298	290
Ra	97.0	98.1	98.3	96.3	96.6	96.9	95.1	95.4
R1	99	99	99	98	97	97	97	97
R2	97	98	99	96	97	97	96	96
R3	90	94	98	95	96	95	94	95
R4	99	98	98	96	98	94	97	97
R5	98	99	99	97	96	97	95	96
R6	98	99	98	93	93	98	92	93
R7	98	99	97	98	97	98	95	95
R8	97	99	98	97	99	99	95	94
R9	97	96	95	98	97	96	95	95
R10	90	94	98	91	91	95	90	90
R11	90	90	91	90	91	90	91	91
R12	91	95	98	92	92	95	91	92
R13	99	99	99	98	97	97	97	97
R14	92	95	98	97	98	96	97	97
R15	99	98	97	98	99	98	98	98

从表2中可以看到,程序模拟得到的LED白光光源的一般显色指数在95.1~98.3之间,在3500 K时有最大值98.3,且一般显色指数都在90以上。光源的LER在290~347 lm/W之间,色温越高,LER值越小,这是因为随着色温的增加,光源光谱中蓝光的比例增加,而蓝光会使光源的LER值降低。

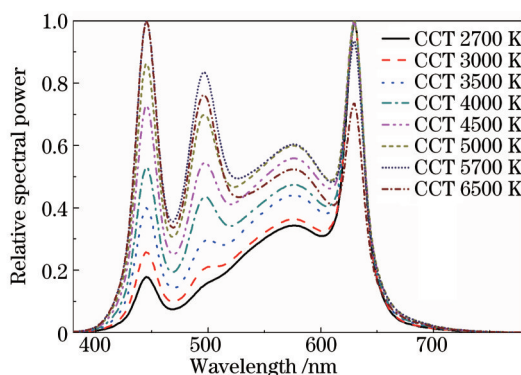


图4 色温为2700 K~6500 K范围内计算模拟的混合白光相对光谱功率分布

Fig.4 Simulative SPDs of mixed white light at CCT of 2700 K to 6500 K

### 3 实验研究

采用波长为445 nm的蓝光LED芯片激发荧光峰值波长分别为535 nm和585 nm的绿色和橙色荧光粉,通过选配绿橙色荧光粉比例和合适的粉胶比,在实验室制作完成暖白(B\_G\_O)LED光源。为了获得满足条件的B\_G\_O光源,B\_G\_O光源中445 nm蓝光LED的光功率比例范围为0.02~0.04;538 nm绿光的光功率比例范围为0.35~0.39;橙光的光功率比例范围为0.59~0.61。

实验装置结构如图5所示,主要包括LED光源模块、带PWM调光功能的LED驱动和控制模块,实物装置如图6所示。光源模块由蓝青红和暖白(B/Cy/R/B\_G\_O)4种LED组成,每种选用4颗,灯珠排布如图7所示,这样排布的目的是为了使LED混光更均匀。

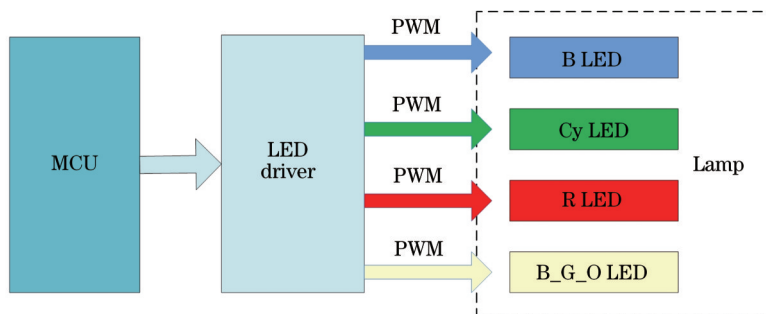


图 5 实验装置结构

Fig.5 Structure of experimental facility

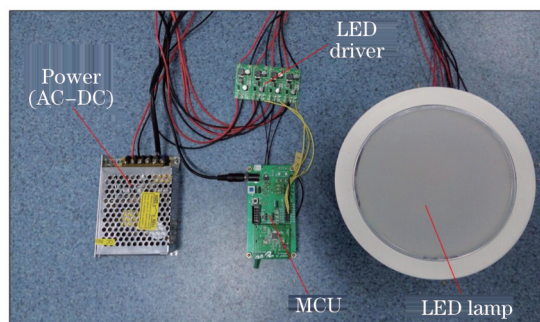


图 6 装置实物图

Fig.6 Device figure

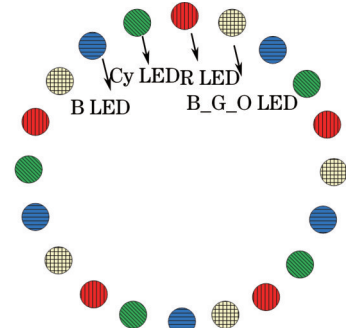


图 7 四色 LED 光源模块的结构示意图

Fig.7 Structure diagram of four color LEDs light source module

通过控制模块发送指令到 PWM 驱动电路来调节电流占空比,从而得到每个色温下 B/Cy/R/B\_G\_O 4 种 LED 所需的光通量。通过 PWM 改变电流占空比,可以控制 B/Cy/R/B\_G\_O 4 种 LED 光通量的配比,从而实现色温在 2700 K ~6500 K 连续可调。通过积分球实验测试的结果如表 3 所示,各个色温对应的相对光谱功率分布如图 8 所示。

从表 3 中可以看到,实验测得白光 LED 的一般显色指数在 95.4~98.1 之间,在 3500 K 时有最大值 98.1,且一般显色指数都在 90 以上。光源的 LER 在 286~336 lm/W 之间。

通过比较表 2 和表 3 可知,一般显色指数 Ra 在色温为 3000 K 时有最大差值为 2.2(误差约 2%),LER 在色温为 2700 K 和 4000 K 时有最大差值 11 lm/W(误差约 3%),说明计算模拟和实验数据的一致性很好。以色温为 6500 K 为例分析,模拟光谱与实际测量光谱如图 9 所示。从图中可以看出光谱存在一定的差异,光源的显色指数、LER 等参数都是与光谱有关的,这也解释了为什么模拟结果与实测结果存在偏差。光谱产生偏差的原因主要有以下 3 点:1) Ohno 的数学模型与芯片的实际发光光谱存在一定的偏差,虽然这个偏差很小,但是多种 LED 光谱叠加后,这个偏差会得到一定的放大;2) 实验测量过程中 LED 会发生光衰,导致实际使用的 LED 的发光光谱与程序模拟的光谱产生一定的偏差。3) 模拟光谱选择的是 LER 为最大值对应的 4 种混

色LED的光功率配比,而实验测试得到的光谱不一定是LER最大时对应的光功率配比。

表3 色温在2700 K~6500 K范围内R1~R15的实验测量值

Table 3 Value of R1 to R15 of experimental result at CCTs of 2700 K to 6500 K

CCT/K	2717	3002	3507	4009	4513	5002	5668	6468
LER/(lm/W)	336	333	331	322	316	305	293	286
Ra	95.4	95.9	98.1	97.1	95.9	96.3	96.3	96.3
R1	95	96	99	98	99	98	97	97
R2	99	99	98	98	96	97	98	97
R3	90	91	96	97	93	95	99	95
R4	92	93	96	96	96	95	93	95
R5	97	97	99	97	97	95	96	96
R6	98	98	99	95	94	94	95	94
R7	97	97	99	98	96	98	95	98
R8	95	96	99	98	96	98	97	98
R9	95	95	95	98	97	97	97	97
R10	94	95	96	94	90	90	96	90
R11	90	91	94	92	93	90	90	90
R12	94	94	93	96	95	94	97	95
R13	98	99	98	98	97	98	97	98
R14	92	94	97	99	96	97	99	97
R15	97	98	98	98	96	99	98	100

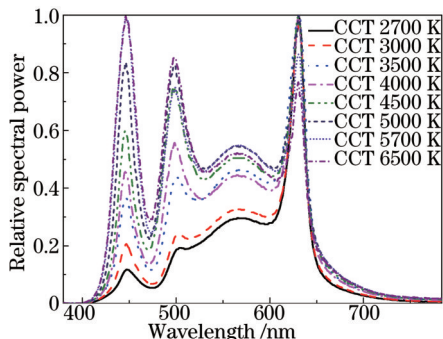


图8 色温为2700 K~6500 K范围内实验测量的混合白光相对光谱功率分布

Fig.8 Experimental SPDs of mixed white light at CCT s of 2700 K to 6500 K

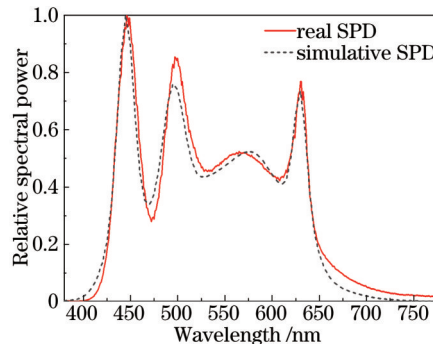


图9 色温为6500 K时模拟光谱与实际光谱对比  
Fig.9 Simulative SPD compared with real SPD at CCT of 6500 K

在以后的研究中,可以通过以下两点来减小偏差:1)采用更加合适的数学模型或者使用LED的真实光谱进行Matlab模拟;2)在散热条件好的环境下进行实验。

## 4 结 论

研究了LED光源的色温可调和显色特性,提出用暖白(445 nm蓝光芯片激发峰值波长为535 nm和585 nm的绿色和橙色荧光粉)、红(632 nm)、青(495 nm)、蓝(445 nm)光4种LED光源混光,从理论和实验上得到了超高显色指数和色温可调的LED白光光源。采用PWM调光技术,控制参与混光的各LED之间的光通量配比,实现色温可调。实验测量得到光源的一般显色指数Ra在95.4~98.1之间、且特殊显色指数(R1~R15)都在90以上,最高辐射发光效率(LER)为336 lm/W。

- 1 Philippe S, Anthony P, Dirk P. Selecting conversion phosphors for white light-emitting diodes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 158(6): R37-R54.
- 2 Zhang Jinhua, Zhu Daqing, Wang Jiexian. Study on high CRI white LED integrated with three chips[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(5): 667-671.  
张锦华, 朱大庆, 王加贤. 三芯片集成高显色指数白光LED的研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(5): 667-671.
- 3 He G X, Zheng L H. White-light LED clusters with high color rendering[J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2955-2957.
- 4 Cao Yujie, Jin Shangzhong, Cen Songyuan. Design for LED lamps with high color rendering index[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222002.  
曹宇杰, 金尚忠, 岑松原. 高显色指数LED灯的设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222002.
- 5 Li Ning, Jin Peng. Study on color temperature tunable four chips white LEDs[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(1): 28-33.  
李 宁, 金 鹏. 四芯片色温可调白光LED的研究[J]. 半导体光电, 2015, 36(1): 28-33.
- 6 Ingo S, Marc S. Color temperature tunable white light LED system[J]. SPIE, 2006, 6337: 63371F.
- 7 Wei Qifeng, Chen Changying, Li Longliang, *et al.*. Investigation on realization of color temperature white light LED[J]. Research & Progress of SSE, 2013, 33(4): 359-362.  
魏其锋, 陈长缨, 李龙亮, 等. 一种实现色温可调白光LED的方法研究[J]. 固体电子学研究进展, 2013, 33(4): 359-362.
- 8 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.  
徐代升, 陈 晓, 朱 翔, 等. 基于冷暖白光LED的可调色温可调光照明光源[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0123004.
- 9 Yu Jianhua, Chen Riguang, E Lei, *et al.*. Experimental study on tunable color temperature white light with high color rendering index[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(3): 395-397.  
余建华, 陈日广, 鄂 雷, 等. 可调色温的高显色指数LED白光光源的实验研究[J]. 半导体光电, 2014, 35(3): 395-397.
- 10 Sun C C, Chen C Y, Chen C C, *et al.*. High uniformity in angular correlated-color-temperature distribution of white LEDs from 2800K to 6500K[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6622-6630.
- 11 Liu Pingyu, Chen Changying, Zhang Hao, *et al.*. Adjustable color temperature LED illumination system based on RWB model[J]. Research & Progress of SSE, 2014, 34(2): 163-169.  
刘平宇, 陈长缨, 张 浩, 等. 基于红白蓝模式色温可调的LED照明系统[J]. 固体电子学研究进展, 2014, 34(2): 163-169.
- 12 Zheng Lihong. Color Temperature Tunable LED White-Light with High Color Rendering Research[D]. Shanghai: Dong hua University, 2010: 28-39.  
郑利红. 高显色可调色温LED白光的研究[D]. 上海: 东华大学, 2010: 28-39.
- 13 Zhong P, He G X, Zhang M H. Spectral optimization of the color temperature tunable white light-emitting diode (LED) cluster consisting of direct-emission blue and red LEDs and a diphosphor conversion LED[J]. Optics Express, 2012, 20(S5): A684-A693.
- 14 Ohno Y. Spectral design considerations for white LED color rendering[J]. Optical Engineering, 2005, 44(11): 111302.
- 15 Luo H J, Zhang S D, Jin P. Optimization of trichromatic color temperature tunable white light LEDs[C]. Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011: 287-290.
- 16 Shieh J Y, Wang L K, Chiu M L. A high color rendering index on multichip LED light source[J]. Circuits and Systems, 2012, 3(1): 107-110.
- 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 Hu Weijie. Modern Color Science and Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 390-397.  
胡威捷. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 390-397.
- 19 Yang Wu, He Guoxing. A mathematical model for spectra of both LEDs and phosphors[J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 532-537.  
杨 武, 何国兴. LED和荧光粉光谱数学模型[J]. 应用激光, 2012, 32(6): 532-537.

栏目编辑: 张浩佳