

光源照射下物体有效反射亮度

姚 其 顾蓓蓓*

深圳大学建筑与城市规划学院, 广东 深圳 518061

摘要 通过研究不同色温(CT)黑体辐射光源对于暖色物体以及冷色物体作用后的有效反射亮度,以及不同主波长(DW)高斯分布光源对一定主波长物体的有效反射亮度,得到不同光源色温、主波长对于物体有效反射亮度的影响规律,并用于多芯片发光二极管(LED)光谱合成。结果表明,一般情况下,光源色温与物体色温匹配时,相应有效反射亮度更高,而光源主波长与物体主波长相适应时,有效反射亮度也会更高。多芯片LED合成中,相匹配物体主波长芯片能够得到相对更高的有效反射亮度,是提升有效效率的主要因素,同时也要考虑光源光色效果。单芯片纯度高的RGB芯片合成LED对于特定物体色样更容易得到高的亮度反射率,而WRB芯片合成LED,由于白光芯片纯度低,合成LED对于各色样反射率稳定性更好。

关键词 光谱学; 色温; 主波长; 光谱反射曲线; 光谱合成

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.033002

Effective Reflection Luminance of Object under Light Source

Yao Qi Gu Beibei

College of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518061, China

Abstract The effective reflection luminance of different color temperature (CT) blackbody radiation light sources on warm-toned and cold-toned samples and different dominant wavelength (DW) Gaussian light sources on samples with destined DW are studied. How different CT and DW of light sources work on reflection luminance are obtained. Results show that matched CT of light source and object lead to higher effective reflection luminance, and matched DW of light source and object also lead to higher effective reflection luminance. In multi-chips light emitting diode (LED) spectrum synthesis, matched DW can achieve relatively higher effective reflection luminance and is the key importance of improving effective efficiency, and color appearance of light source should also be taken in consideration. RGB chip LEDs with high purity single chip are more likely to reach high luminivity reflectivity for a designated object. Because of white chip has a low purity, WRB chip LEDs are more stable in luminance reflectivity for all kinds of objects.

Key words spectroscopy; color temperature; dominant wavelength; spectrum reflectance curve; spectrum synthesis

OCIS codes 330.1690; 300.6170; 330.1730

1 引言

实践表明,光源与物体作用过程中,采用暖色调光源照射暖色物体,反射效果较好且被照射物体饱和度更高;同样,采用冷色调光源照射冷色物体,整体反射效果也较其他色调光源好。使用与物体反射率匹配的相应光谱光源,照明利用率更高,且效果更好;但是由于缺乏相关定量的研究,不能清楚的阐释其作用机理,相应的光源设计不能够优化。

对于光源照射物体最直接的描述是亮度,进入人眼感知的反射亮度是有效亮度,而与之相关的是反射率。在一般照明应用中,物体的反射率采用平均反射率,对于饱和度较低物体影响相对较小,而照射一些饱

收稿日期: 2014-09-23; 收到修改稿日期: 2014-11-03; 网络出版日期: 2015-02-05

基金项目: 广东省自然科学基金博士启动基金(S2013040016769)

作者简介: 姚 其(1984—),男,博士,讲师,主要从事视觉与照明,光度学与色度学等方面的研究。

E-mail: yaoqi@szu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 277408362@qq.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

和度较高物体则存在很大的亮度偏差。有效亮度的提升,很大方面依赖于光源的效率,传统光源已经相对成熟,其效率也不再有更大的提升空间,而发光二极管(LED)光源效率一直在稳步提升。除了提升芯片效率外,通过光谱合成的方式来得到最佳光源效率也是重要的研究方向。早期研究中,Waymouth^[1]对荧光灯最佳效率进行过研究,得到荧光灯最佳的组合光谱是峰值波长为450,540和610 nm所组成的光谱,其效率和显色性能达到最佳组合。传统光源由于发光机制的限制,通常不具有可调性,可选择性少;多芯片LED^[2]光源则具有良好的光谱选择性,可以通过设计和控制得到最优光谱选择^[3]。对于多芯片LED混合中的问题,从光学^[4]、色彩控制^[5]、亮度控制^[6-7]、色温补偿^[8]等方面都可以进行解决。

多芯片LED光源合成理论研究中较少考虑被照射物体的反射特性^[9]。在一般功能性照明中,由于照射物体的多样化,被照射物体的个体特性影响不大;而对于有些单一照明对象,物体的光谱反射特性变得重要,对于照明后反射亮度影响较大。通过针对物体光谱反射特性研究多芯片LED光源合成,使得在保证LED光色的同时,对于相应特定照明能达到更好的反射亮度。

本文从光谱理论出发,考虑物体光谱反射曲线,研究光源色温(CT)对于不同色温物体的反射亮度影响以及不同主波长(DW)光源对于物体的反射亮度影响,由量化角度给出照明应用中光源的选择依据。物体光谱反射曲线通常采用光谱反射测试仪测量,同时也有算法对其精度进行提升^[10]。随着成像技术的发展,也有研究根据成像色度,通过算法进行光谱重构^[2,11],所获得的物体光谱反射曲线能够达到工程所需精度,同时也为量化照明效率和照明效果提供了很好的契机。

2 亮度的计算及相关因素

照射特定的物体时,反射回人眼的亮度才是相对有效的亮度,在一般亮度计算中,对于物体采用平均反射率,实际上,不同物体对每个波段的具体反射率是不同的,特别是具有一定色彩的物体,其对应的反射亮度是每个波段不同反射亮度积分的结果,因此要考虑其光谱反射曲线。为了便于研究,以类朗伯体光源照射一定距离处的被照面所得亮度作为参考亮度,对应的配光曲线以及相对等亮度图,如图1所示。光源对应光效设为100 lm/W,被照射面为100%的反射率。使用不同光源进行计算时,只考虑光源效率和被照射面的光谱反射特性,其他参数都是一致的,同时所得亮度都是相对亮度值。研究不同物体反射特性对于反射亮度的影响时,选择典型暖色色样浅灰红色和冷色色样淡蓝色各一种,此两种色样为显色指数(CRI)计算中使用的8种一般样品中的两种,其相应的色度参数及光谱反射曲线如图2所示,为便于对比和分析,被照射物体选择两种色样各一半。对于物体的反射率不再使用平均反射率计算,而是考虑被照射物体的反射特性,用(1)式计算亮度反射率,其中 ρ 为亮度反射率, $P(\lambda)$ 为光源光谱能量, $V(\lambda)$ 为光谱光视效率函数, $\rho(\lambda)$ 为光谱反射率。

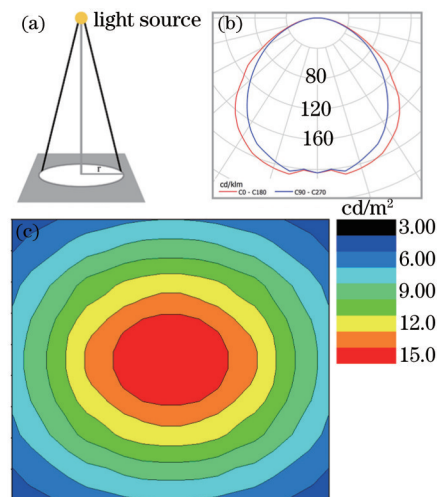


图1 光源照射物体相对亮度分布图。(a) 照射物体; (b) 配光曲线; (c) 相对亮度图

Fig.1 Relative luminance contour of illuminated object. (a) Illuminated object; (b) photometric curve; (c) relative luminance contour

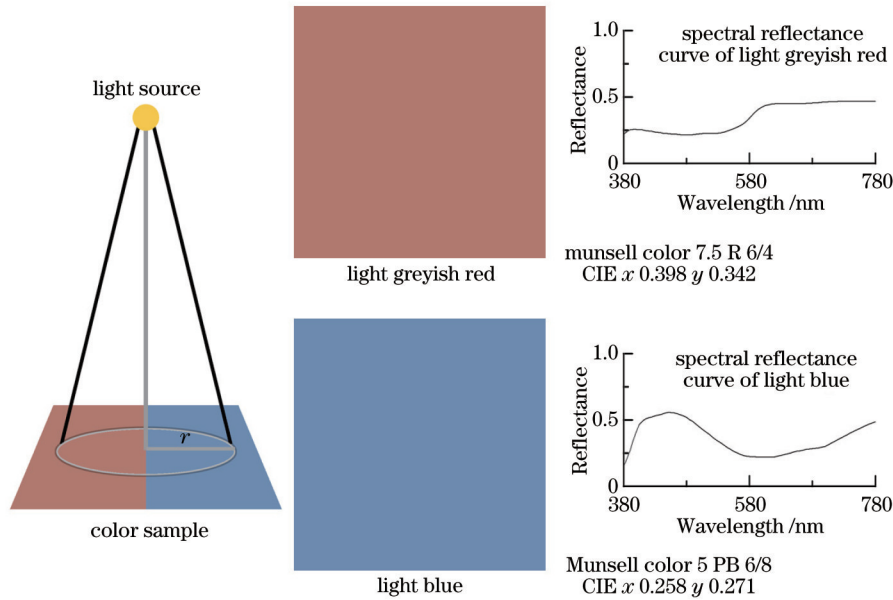


图2 颜色色样浅灰红色及淡蓝色相关色度参数

Fig.2 Corresponding chromaticity parameters of color samples light greyish red and light blue

$$\rho = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)\rho(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

3 色温的影响

3.1 黑体辐射光源

光源效率相同,而色温不同时,照射暖、冷色物体,所得到的反射亮度也不相同。研究色温对于有效亮度的影响,采用2000 K~7000 K的黑体辐射光源,其光谱能量分布曲线如图3所示,在其他参数都相同的情况下,形成的有效亮度如图4所示。对于浅灰红色色样,低色温时亮度分布高,随着色温升高,对应的亮度分布逐渐下降;对于淡蓝色色样,随着色温升高,对应的整体亮度分布逐渐升高。亮度反射率随着光源色温变化趋势如图5所示。

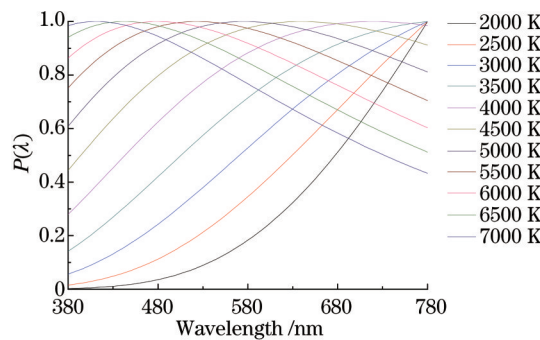


图3 不同黑体辐射光源光谱能量分布曲线

Fig.3 Spectrum power distribution under different blackbody radiation light sources

3.2 传统光源及高分子发光二极管(PLED)

采用传统光源及高分子发光二极管(PLED)照射两种色样,同时考虑光源色温,白炽灯光效 10 lm/W、色温 2600 K,荧光灯光效 80 lm/W、色温 3100 K,高压汞灯(HPM)光效 60 lm/W、色温 3300 K,高压钠灯(HPS)光效 130 lm/W、色温 1900 K,金卤灯(MH)光效 100 lm/W、色温 4000K, PLED 光效 110 lm/W、色温 6460 K。在相同功率下,光源光效不同时,相对应的亮度成比例提升或下降。图6为光源照射物体对应亮度图,光源光效起到主导作用,低光效光源如白炽灯亮度就非常低。在光效相差不是很大时,色温影响作用较大, PLED 光

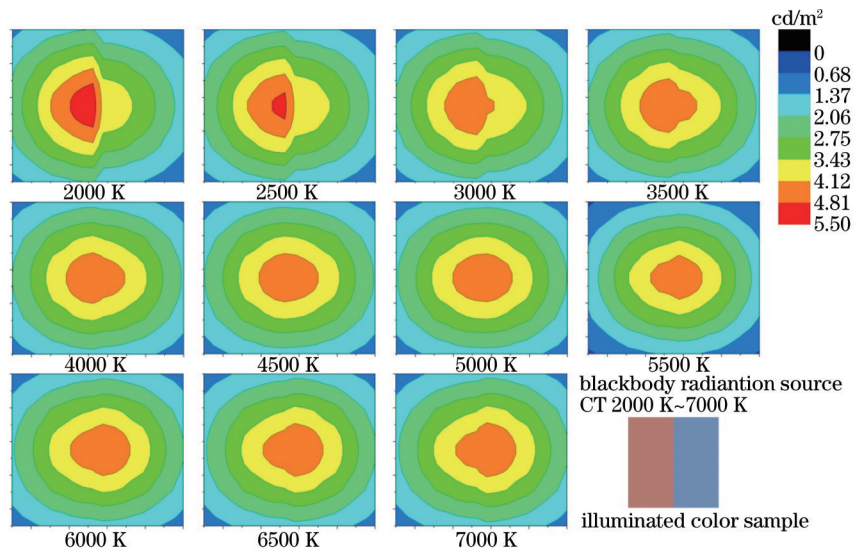


图4 不同黑体辐射光源对应的相对亮度图

Fig.4 Relative luminance contours under different blackbody radiation light sources

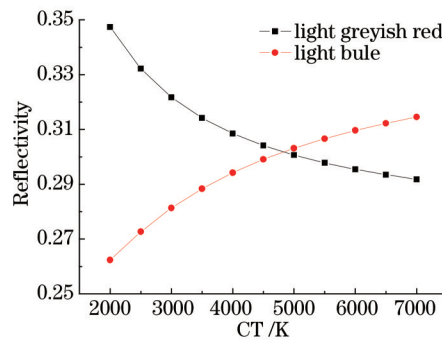


图5 不同黑体辐射光源对应的亮度反射率

Fig.5 Luminance reflectivity of color samples under different blackbody radiation light sources

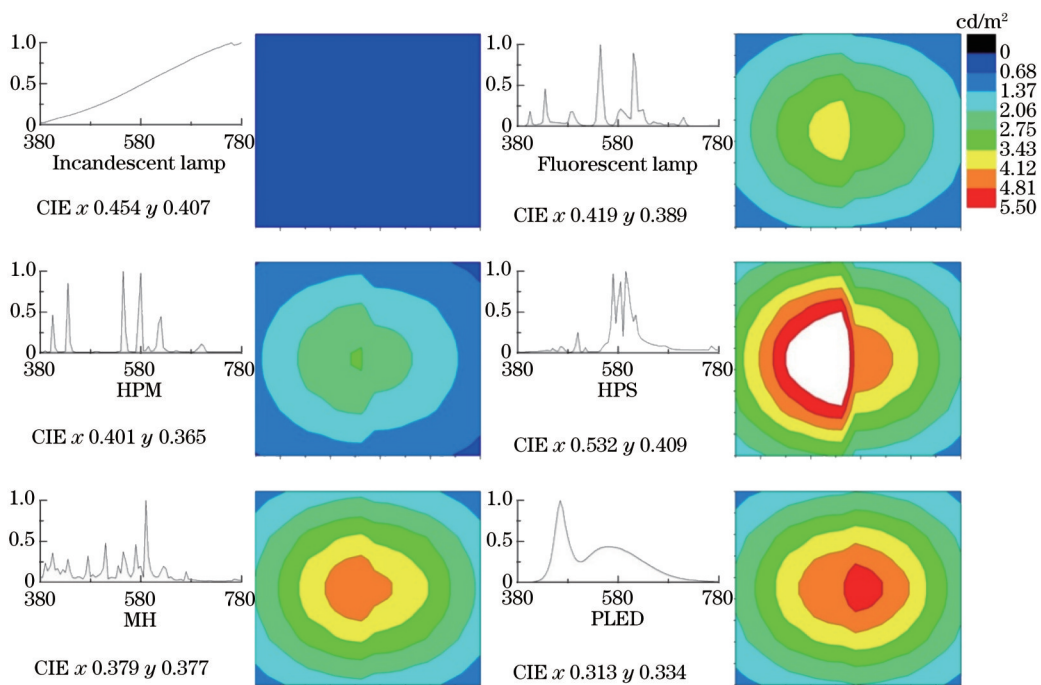


图6 光源照射物色样对应亮度图

Fig.6 Luminance contours of light sources on color samples

效低于高压钠灯,照射浅灰红色色样,高压钠灯亮度分布远优于 PLED,但是照射淡蓝色色样,PLED 虽然光效低,其亮度分布优于高压钠灯。

4 光源主波长的影响

4.1 不同主波长光源的影响

物体的色彩可以用主波长和色纯度描述。光源主波长与物体光谱反射曲线主波长在不同的关系下,对于物体反射亮度的影响也是不一样的。一般多芯片 LED 光源半峰全宽在 20~30 nm 之间,可以用高斯分布模型描述^[12]。研究光源光谱主波长与色样主波长各关系情况下对亮度反射率的影响,采用一组不同峰值波长,半波宽为 30 nm 的高斯分布光源,得到各光谱反射曲线的影响,所选择的峰值波长分别是 440, 470, 500, 530, 560, 590 和 620 nm,假设各光谱光效参数相同。在光源纯度比较高,即半峰全宽小于 50 nm 时,LED 峰值波长与主波长接近^[8],误差在几纳米,研究中所选用光源纯度很高,故对所选用高斯分布光源不进行峰值波长与主波长换算,直接用峰值波长作为相应主波长。浅灰红色色样主波长 600 nm、纯度 22.2%,淡蓝色色样主波长 480 nm、纯度 31.1%,各主波长光源对色样的亮度反射率如图 7 所示。曲线趋势表明,当光源主波长与物体色样主波长越接近时,其相对应的亮度反射率越高。

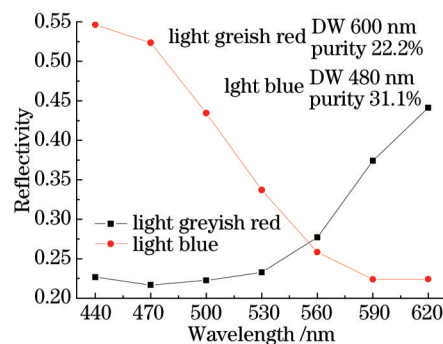


图 7 不同主波长光源对色样的亮度反射率

Fig.7 Luminance reflectivity of color samples under light sources with different dominant wavelengths

4.2 RGB 三芯片 LED 光源合成实例

多芯片 LED 具有高效率、易调光、易搭配等优点,已有研究进行了多芯片最优效率合成。本实例将针对具体被照明物体,考虑相应反射亮度,进行多芯片 LED 光源合成。三芯片 LED 一般为 RGB 三种光色 LED 芯片合成,选用半峰全宽 30 nm,峰值波长为 450、540、610 nm 的高斯分布光源进行模拟研究,分别照射浅灰红色色样和淡蓝色色样,其对应的亮度反射率如表 1 所示。

表 1 主波长 450、540、610 nm 光源对色样的亮度反射率

Table 1 Luminance reflectivity of color samples under light sources of DW 450, 540, 610 nm

	Luminance reflectivity		
	DW 450 nm	DW 540 nm	DW 610 nm
Light greyish red	0.222	0.242	0.428
Light blue	0.547	0.308	0.222

对于两种色样,分别合成两种不同的多芯片 LED 光源,以得到更高的反射亮度。照射浅灰红色色样,主波长 610 nm 对应亮度反射率相对较高,在合成光谱时,所占比例相对较高,由 3.1 节分析可知,对应色温较低时,反射亮度更高;同理,照射淡蓝色色样,主波长 450 nm 对应亮度反射率较高。三芯片 LED 合成不同色度时,采用下式进行合成,

$$\begin{cases} (k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 l_3)x = k_1 l_1 x_1 + k_2 l_2 x_2 + k_3 l_3 x_3 \\ (k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 l_3)y = k_1 l_1 y_1 + k_2 l_2 y_2 + k_3 l_3 y_3 \\ k_1 + k_2 + k_3 = l \end{cases} \quad (2)$$

式中 x, y 为拟合成 LED 对应的色度坐标, $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$, 为三种芯片光谱对应的色度坐标, $l = X + Y + Z$, X, Y, Z 为三刺激值, l_1, l_2, l_3 分别对应三种芯片三刺激值之和, k_1, k_2, k_3 分别对应三种芯片,为待求系数比例。RGB 芯片 LED 合成不同色温光源时各部分所占比例如表 2 所示,并得到各色温合成光谱照射两种不同色样

的亮度反射率。综合考虑亮度反射率以及光源自身光色,使其光色更接近白光,合成适用于照射浅灰红色多芯片LED光源的相关色温(CCT)为3000 K,适用于照射淡蓝色多芯片LED光源的相关色温为6000 K,对应光谱分布如图8所示。

表2 RGB芯片LED合成光源各部分所占比例

Table 2 Proportion of each part of RGB chip LED for composing light source

CCT /K	Proportion of each part			Luminance reflectivity	
	B	G	R	Light greyish red	Light blue
2000	0.047	0.269	0.684	0.368	0.260
3000	0.133	0.372	0.495	0.331	0.297
4000	0.212	0.400	0.388	0.310	0.325
5000	0.273	0.403	0.324	0.297	0.345
6000	0.318	0.399	0.283	0.288	0.360
7000	0.352	0.393	0.255	0.282	0.370

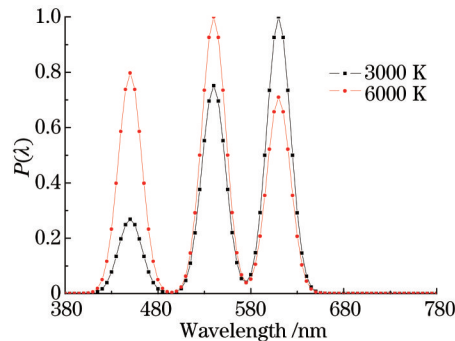


图8 RGB芯片LED色温3000 K和6000 K光源合成光谱能量分布

Fig.8 Spectrum power distribution of composed RGB chip LED with CT 3000 K and 6000 K

4.2 WRB三芯片LED光源合成实例

多芯片LED混合时,相对自由性比较大,白光芯片也会作为芯片混合中的一种^[13],而由于其纯度相对较低,因此合成光谱与RGB芯片混合时会有差异。选择一种白光芯片与峰值波长610 nm的红光芯片、峰值波长480 nm的蓝光芯片混合。白光LED对应的主波长576 nm、色纯度65.3%,相对纯度低,其光谱分布曲线如图9所示。三种芯片对两种色样的反射率如表3所示,红光LED芯片照射浅灰红色色样反射率更高,而蓝光LED芯片照射淡蓝色色样反射率更高。白红蓝(WRB)芯片色度坐标分布及不同色温黑体辐射对应色度坐标如图10所示,色温2000 K色度坐标不在WRB芯片对应色域范围,故不能采用此三种芯片合成对应色度坐标光源。采用(2)式进行光谱合成时,WRB芯片LED合成不同色温时各部分所占比例如表4所示,并得到各色温合成光谱照射两种不同色样的亮度反射率。WRB三芯片LED合成光源,对于两种色样的有效亮度反射率同样随着色温呈单调关系,但相较于RGB芯片合成光源,其反射率相对变化范围更小,最大反射率小于RGB芯

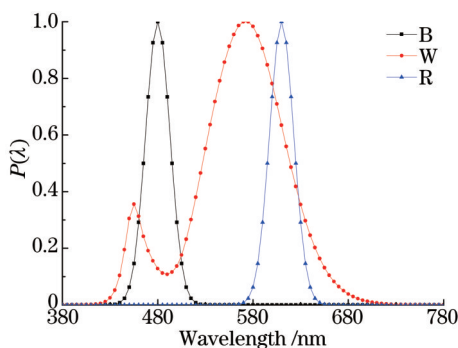


图9 红光、白光与蓝光芯片光谱能量分布

Fig.9 Spectrum power distribution of red light, white light and blue light chip

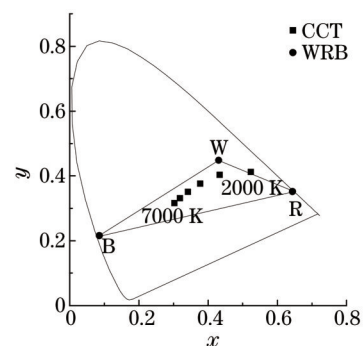


图10 WRB芯片色度坐标分布及不同色温黑体辐射对应色度坐标

Fig.10 Chromatic coordinates of WRB chips and different CCT blackbody radiations

片合成光源,主要是受到纯度相对较低的白光LED影响,但其对于各物体色样亮度反射率都比较稳定。

表3 白光LED、主波长450、610 nm光源对色样的亮度反射率

Table 3 Luminance reflectivity of color samples under white light source and light sources of DW 450 nm and 610 nm

	Luminance reflectivity		
	White LED	DW 480 nm	DW 610 nm
Light greyish red	0.309	0.217	0.428
Light blue	0.269	0.499	0.222

表4 WRB芯片LED合成光源各部分所占比例

Table 4 Proportion of each part of WRB chip LED for composing light source

CCT/K	Proportion of each part			Luminance reflectivity	
	B	W	R	Light greyish red	Light blue
3000	0.255	0.378	0.367	0.324	0.275
4000	0.479	0.279	0.242	0.313	0.296
5000	0.588	0.196	0.216	0.308	0.312
6000	0.643	0.141	0.216	0.305	0.325
7000	0.673	0.105	0.222	0.304	0.336

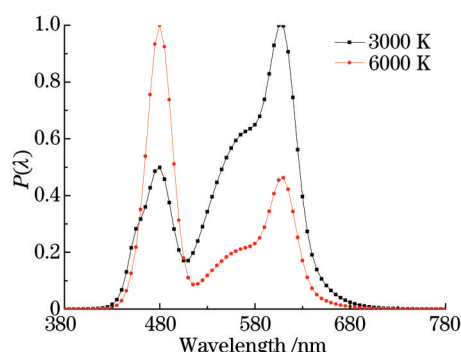


图11 WRB芯片LED色温3000 K和6000 K光源合成光谱能量分布

Fig.11 Spectrum power distribution of composed WRB chip LED with CCT 3000 K and 6000 K

5 结 论

综上所述,可以得到以下结论:1) 相同光效下,暖色光源照射暖色物体,冷色光源照射冷色物体,有效亮度更高;2) 相同光效下,单色光光源主波长与物体光谱反射曲线对应主波长越接近,其反射亮度也相应越高,在混色过程中,所占比例应该适当增大;3) 多芯片LED光源光谱合成过程中,光源光色,光谱反射曲线以及物体光色是优化中的三个重要参数;4) 三芯片LED合成中,合成色温与特定物体亮度反射率呈单调或是单峰关系;5) RGB芯片LED合成时,对于特定物体色样,可以达到相对更高的亮度反射率;6) WRB芯片合成时,由于白光芯片纯度较低,优化合成的光源对特定物体色样的亮度反射率要低于RGB芯片,但其对各物体色样物体反射率都比较稳定。由于真实物体反射率都是具有一定规律,研究结果对于一般情况光源与物体都是适用的,但部分特殊情况下,由于同色异谱现象的存在,会存在与研究不太一致的情况。

功能性照明中,光源光色需要在可用色温描述的范围,在此限制条件下,求得对相应照明物体最优亮度反射率;在特殊照明情况下,对光源光色没有限制,选择较饱和光色光源时,使得光源主波长与物体主波长接近,其对应的亮度反射率更高。

参 考 文 献

- Waymouth J F. Electric Discharge Lamps[M]. London: MIT Press, 1971.
- Ji H, Jeong R, Hoo K, *et al.*. New paradigm of multi-chip white LEDs: combination of an InGaN blue LED and full down-converted phosphor-converted LEDs[J]. Opt Express, 2011, 19(10): A270-A279.
- Yao Q, Ju J, Liang R, *et al.*. Relationship between peak wavelength and dominant wavelength of light sources based on vector-based dominant wavelength calculation method[J]. Leukos, 2014, 10(1): 11-18.

- 4 Chien W, Sun C, Moreno I. Precise optical model of multi-chip white LEDs[J]. *Opt Express*, 2007, 15(12): 7572-7577.
- 5 He X, Cao G, Zou N. Simulation of white light based on mixed RGB LEDs[C]. *Proceedings of ICCTA*, 2011. 961-964.
- 6 Piao Yan. Luminance parameters in full color LED display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(5): 503-506.
朴 燕. 全色LED显示器中亮度参数的研究[J]. *液晶与显示*, 2008, 22(5): 503-506.
- 7 Muthu S, Gaines J. Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design [C]. *38th IAS Annual Meeting*, 2003.
- 8 Chow C T, Lee C L, Lin T L, *et al.*. Color temperature compensation for LED lighting illumination[C]. *Proceedings of the 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2012.
- 9 Romney A K. Relating reflectance spectra space to Munsell color appearance space[J]. *J Opt Soc Am*, 2008, 25(3): 658-666.
- 10 Shimano N, Terai K, Hironaga M. Recovery of spectral reflectance of objects being imaged by multispectral cameras[J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(10): 3211-3219.
- 11 Chen Yiyi, Xu Haisong, Zhang Xiandou, *et al.*. Study of spectral reconstruction based on digital camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1416-1419.
陈奕艺, 徐海松, 张显斗, 等. 基于数码相机的光谱重构研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1416-1419.
- 12 Davis W, Ohno Y. Color quality scale[J]. *Opt Eng*, 2010, 49: 033602-033616.
- 13 Zhong P, He G, Zhang M. 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]. *Opt Express*, 2012, 20(105): A684-A693.

栏目编辑: 苏 岑