

基于RGBW四色LED的混光研究

宋鹏程¹ 文尚胜^{1,2} 陈颖聪¹

¹华南理工大学高分子光电材料与器件研究所, 广东 广州 510640

²华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640

摘要 根据RGBW四色混光方程组,结合脉冲宽度调制法的特点推导出占空比与色品坐标的函数关系。借助Matlab软件对混合光的光效和一般显色指数进行多元约束条件下寻优,并通过实验验证。结果表明:RGBW光源模块可实现2703 K~7692 K色温范围的白光,优化目标为显色性能最佳时,混合光的一般显色指数高达95,在光效最大的优化目标下,混合光可以实现108 lm/W的高光效。为了使光源模块同时具有优良的光效和显色性能,提出对光效和一般显色指数同时进行寻优。模拟实验表明:适当降低光效可以显著提高显色性能;降低显色性能同样可以改善光效。通过平衡光效和显色性能,可以实现一般显色指数大于90且适用于多数场所的高光效白光。

关键词 光电子学; 动态色温; 发光二极管; 脉冲宽度调制

中图分类号 TN206 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0923004

Research on Color Mixing Based on RGBW-LEDs

Song Pengcheng¹ Wen Shangsheng^{1,2} Chen Yingcong¹

¹*Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China*

²*State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China*

Abstract A functional relationship between chromaticity coordinate and the duty cycle based on the RGBW color mixing equations and the pulse width modulation drive (PWM) is deduced. Multi-constraint optimization simulation of the luminous efficacy of source (LES) and color rendering index of the mixed-light is carried out on a Matlab program, which is further verified by the experiments. The results show that the RGBW light source can produce a wide range of color temperature from 2703 K to 7692 K. Under the highest R_a achievable, the R_a reaches 95, while the LES can reach 108 lm/W under the condition of an optimized LES. Furthermore, by reducing the color rendering index, the luminous efficiency improves significantly. The color rendering index likewise increases by reducing the luminous efficiency. By balancing these two factors, it has found that RGBW light source with high LES and R_a over 90 can best satisfy the demand of the current lighting manufacturing.

Key words optoelectronics; dynamic color temperature; light emitting diode; pulse width modulation

OCIS codes 230.0250; 230.3670; 220.2945

1 引言

随着发光二极管(LED)技术的发展,LED光源凭借体积小、绿色节能、响应时间短、可控性能好等诸多优点,在智能照明、植物工厂、可见光通讯等领域得到广泛的应用,被视为替代传统照明光源的第四代照明光源^[1-3]。相关研究表明,照明光源可以通过第三类感光细胞影响褪黑激素和皮质醇的分泌,进而对人体的生理和心理产生重大影响^[4-5],根据季节、情绪、昼夜动态调节光照环境可以提高人对光环境的舒适度,因此色

收稿日期: 2015-04-03; 收到修改稿日期: 2015-06-04

基金项目: 广东省战略性新兴产业专项(2011A081301017,2012A080304012,2012A080304001)、广州市科技计划项目(2013J4300021)

作者简介: 宋鹏程(1990—),男,硕士研究生,主要从事LED智能照明方面的研究。E-mail: spescut@163.com

导师简介: 文尚胜(1964—),男,博士,教授,主要从事有机及无机半导体材料与器件方面的研究。

E-mail: shshwen@scut.edu.cn(通信联系人)

温可调的高显色指数白光LED光源在智能照明领域具有广泛的应用。

目前实现色温可调白光LED的方法主要有:采用冷暖色温LED进行混光,调节冷暖色温LED的混合比例,从而实现色温可调^[6],这种方法只能实现两色品坐标连线上的混合光,调光范围小且混合光的色品坐标偏离黑体轨迹线;采用红/绿/蓝三基色LED进行混光,通过调节三基色的混合比例实现色温的变化,这种光源模块具有调光范围广的优点,由于混合光的光谱缺少琥珀色波段的光,显色指数较低^[7-8];采用光谱丰富的正白、暖白LED各自代替红/绿/蓝光源模块中的绿、红LED以提高混合光的显色性能^[9-10],这种方法虽然可以提高混合光在部分色温段的显色指数,但调光范围受到限制;进一步,在三基色基础上添加白光LED构成的新光源模块可以同时兼顾调光范围和显色性能,相关研究一般采用LED光谱的数学模型进行模拟实验^[11]。综合考虑显色性能和调光范围,RGBW光源模块具有明显的优势。

本文根据四色混光方程组,结合脉冲宽度调制(PWM)调光的光通量与占空比成正比的特点,推导出色品坐标与占空比的函数关系。针对方程组的不定解性,提出借助Matlab软件优化工具箱中的Fmincon函数对混合光的光效和一般显色指数进行多元约束条件下寻优,最后设计实验对寻优结果进行验证。

2 理论计算

PWM调光可以很好地与数字控制技术结合,在智能照明领域具有很大的优势,改变驱动LED的PWM占空比,其色品坐标基本不发生改变,而光通量与占空比近似成正比例函数关系^[12],结合格拉斯曼颜色定律,可推导出 n 种已知色的混光方程组:

$$\begin{cases} Y_m = D_1 Y_1 + D_2 Y_2 + \dots + D_n Y_n \\ x_m = \frac{X_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{C_1 D_1 x_1 + C_2 D_2 x_2 + \dots + C_n D_n x_n}{C_1 D_1 + C_2 D_2 + \dots + C_n D_n} \\ y_m = \frac{Y_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{C_1 D_1 y_1 + C_2 D_2 y_2 + \dots + C_n D_n y_n}{C_1 D_1 + C_2 D_2 + \dots + C_n D_n} \end{cases} \quad (1)$$

调光过程中,混合光直接由占空比决定,占空比是唯一的变量。三色混光方程组的变量数等于方程数,混光方程组有定解。文献[8]以红/绿/蓝光源模块为例,推导出占空比与色品坐标的函数关系:

$$\begin{cases} D_r \frac{Y_r}{y_r} = \frac{(y_g - y_b)(x_b - x) + (y - y_b)(x_g - x_b)}{(y_g - y_b)(x_b - x_r) + (y_r - y_b)(x_g - x_b)} \frac{Y_m}{y} \\ D_g \frac{Y_g}{y_g} = \frac{(y_b - y_r)(x_r - x) + (y - y_r)(x_b - x_r)}{(y_b - y_r)(x_r - x_g) + (y_g - y_r)(x_b - x_r)} \frac{Y_m}{y} \\ D_b \frac{Y_b}{y_b} = \frac{(y_g - y_r)(x_r - x) + (y - y_r)(x_g - x_r)}{(y_g - y_r)(x_r - x_b) + (y_b - y_r)(x_g - x_r)} \frac{Y_m}{y} \end{cases} \quad (2)$$

(1)、(2)式中, X_m 、 Y_m 、 Z_m 是混合光M的三刺激值, Y_i 为光源*i*在满电流工作状态下的刺激值 Y ,在CIE-1931标准色度系统中刺激值 Y 等于光通量。 $C_i = Y_i/y_i$ 为光源*i*在满电流工作下的三刺激值之和。 D_i 和 (x_i, y_i) 分别为光源*i*对应的占空比及色品坐标。

由于四色混光方程组的变量数超过方程数,对于确定的色品坐标和光通量,方程组没有定解。将RGBW光源模块中的白光用R、G、B表示,再结合(2)式可推导出不定解之间的函数关系。将白光LED在满电流工作状态下的光通量和色品坐标代入(2)式,可求得采用红/绿/蓝光源模块实现对应白光时的占空比 D'_r 、 D'_g 、 D'_b ,此时白光可以表示为:

$$[W] = D'_r[R] + D'_g[G] + D'_b[B], \quad (3)$$

对于RGBW混光,混合光M可表示为:

$$[M] = D_r[R] + D_g[G] + D_b[B] + D_w[W], \quad (4)$$

式中 D_w 为白光对应的占空比,将 $[W]$ 用(3)式代替:

$$[M] = (D_r + D_w D'_r)[R] + (D_g + D_w D'_g)[G] + (D_b + D_w D'_b)[B], \quad (5)$$

结合(2)、(5)式可推导出占空比与色品坐标的函数关系:

$$\begin{cases} (D_r + D_w D_r') \frac{Y_r}{y_r} = \frac{[(y_g - y_b)(x_b - x) + (y - y_b)(x_g - x_b)] Y_m}{[(y_g - y_b)(x_b - x_r) + (y_r - y_b)(x_g - x_b)] y} \\ (D_g + D_w D_g') \frac{Y_g}{y_g} = \frac{[(y_b - y_r)(x_r - x) + (y - y_r)(x_b - x_r)] Y_m}{[(y_b - y_r)(x_r - x_g) + (y_g - y_r)(x_b - x_r)] y} \\ (D_b + D_w D_b') \frac{Y_b}{y_b} = \frac{[(y_r - y_r')(x_r - x) + (y - y_r)(x_g - x_r)] Y_m}{[(y_g - y_r)(x_r - x_b) + (y_b - y_r)(x_g - x_r)] y} \end{cases} \quad (6)$$

对于确定的实验光源,占空比是控制混光效果的唯一变量,混合光的光效和一般显色指数是占空比的函数。PWM驱动LED的功率可以表示为: $P_{pwm} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt$ ^[13]。由于LED的温度系数小,调光过程中正向电压受结温变化的影响小,默认调光过程中的正向电压不变,且峰值电流恒定。因此,LED的功率可以简化为: $P_{pwm} = DUI$ 。混合光的整体光效取决于各色LED的光效和对应的占空比:

$$V_{LES} = \frac{Y_m}{P_m} \approx \frac{D_r Y_r + D_g Y_g + D_b Y_b + D_w Y_w}{D_r P_r + D_g P_g + D_b P_b + D_w P_w} \quad (7)$$

需要说明的是,所讨论的LED功率不包括PWM驱动芯片所消耗的功率。

显色指数用来表征光源对被照射物体颜色的还原能力。显色指数的计算实际是通过测量和计算14种标准颜色样品各自在参照光源和待测光源下的色差 ΔE_i 实现的。光源对于某一标准颜色样品的特殊显色指数为^[14]:

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i (i = 1, \dots, 14), \quad (8)$$

一般显色指数指对特定的8个标准颜色样品的平均显色指数:

$$Ra = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (9)$$

一般显色指数是由混合光的光谱功率分布决定,对于红/绿/蓝/白光源模块,其混合光的光谱功率分布可表示为^[15]:

$$S_m(\lambda) = D_r S_r(\lambda) + D_g S_g(\lambda) + D_b S_b(\lambda) + D_w S_w(\lambda), \quad (10)$$

式中 $S_r(\lambda)$ 、 $S_g(\lambda)$ 、 $S_b(\lambda)$ 、 $S_w(\lambda)$ 分别为红、绿、蓝、白LED在满电流工作状态下的光谱功率分布。文献[16]指出PWM调光过程中,结温的变化会引起峰值波长及半峰全宽(FHWM)发生微小变化,默认调光过程中光谱功率分布只有强度发生变化,而峰值波长与半峰全宽不变。通过Matlab软件根据国家标准^[17]可计算出不同占空比组合对应的一般显色指数。

从上文对显色指数和光效的描述可知,对显色指数和光效寻优是一个多变量、有约束和具有非线性函数的复杂问题。而Matlab优化工具箱中的Fmincon函数具有求解多变量有约束非线性函数最值的能力。因此,以占空比为变量,设定光效或一般显色指数为目标函数,在(6)式和占空比小于100%的约束下,利用Fmincon函数对不同色温白光的光效和一般显色指数进行优化。

3 实验测试及结果分析

3.1 实验光源及驱动电路结构

采用六脚RGB大功率LED灯珠及正白LED灯珠组成光源模块。用远方的PMS-80光谱测试仪测量各色LED在满电流工作状态下的色度学参数及相对光谱功率分布,如表1和图1所示。将LED灯珠焊接在铝基板上,由于结温升高引起的色漂移与出光效率降低^[18-19]会导致混合比例失调,为了尽量减小由结温变化造成的误差,需要将铝基板用导热胶固定在散热器上。

驱动电路主要由直流稳压电源、信号发生器、PWM驱动芯片(DD313)、光源模块组成,如图2所示。直流稳压电源将市电转换为电压为6V的直流电,信号发生器将红、绿、蓝、白LED对应的占空比输入到DD313驱动芯片,从而控制各色LED的混合比例完成调光混色实验。

表 1 实验中 LED 灯珠的参数

Table 1 Parameters of LED in the experiment

	x	y	Luminous flux /lm	Peak wavelength/nm	Power/W
R	0.6931	0.3066	44.70	629	0.739
G	0.1444	0.7187	85.22	517	1.067
B	0.1463	0.0357	18.42	456	1.052
W	0.3765	0.3865	119.3	CCT/K	R_a
				4173	69.1

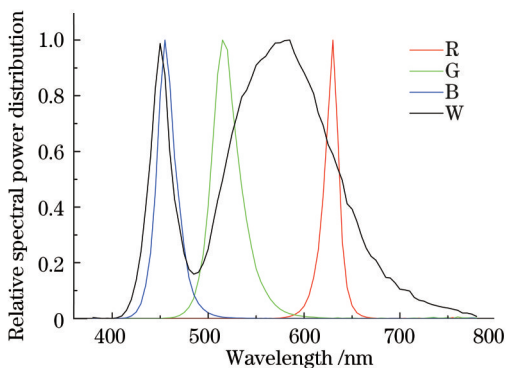


图 1 R/G/B/W LED 相对光谱功率分布

Fig.1 Relative spectral power distribution of R/G/B/W LED

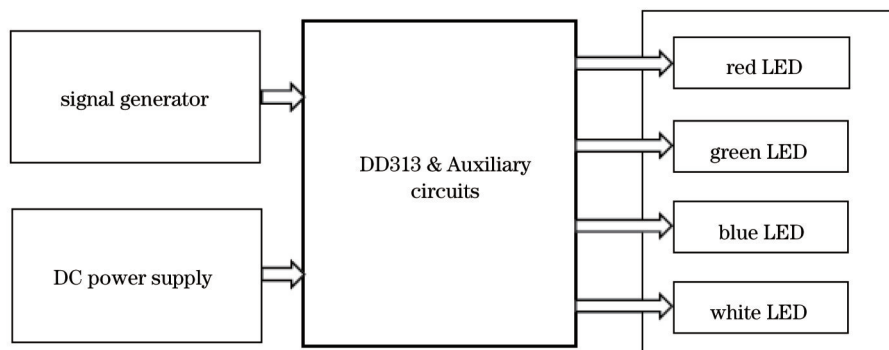


图 2 光源模块驱动电路原理图

Fig.2 Schematic graph of driving circuit of light source module

3.2 实验结果及分析

3.2.1 显色性能最佳

对于目标色品坐标和光通量,混光方程组存在多种解。不同占空比组合对应的混合光虽然可以实现相同的色品坐标,但对应的光谱功率分布不同,显色性能也将不同。为了研究调光过程中光源模块的最佳显色性能,对一般显色指数进行多元约束条件下的寻优,既在(6)式及占空比小于 100%的约束下,通过 fmincon 函数求解方程 $f(D_r, D_g, D_b, D_w) = Ra$ 的最大值及对应的占空比。沿黑体轨迹线,计算出色温范围为 2703 K ~ 7692 K 白光的一般显色指数的最大值,并进行实验验证,实验结果如表 2 和图 3 所示。

如表 2 所示,色温的测量值与设定值误差小于 50 K,最大相对误差为 -1.12%,色品坐标误差小于 0.002,说明(6)式可以精确地指导 RGBW 光源模块进行大范围色温的连续调控。一般显色指数的误差小于 1.2,说明(10)式可以精确地模拟混合光的光谱功率分布。当色温为 3571 K 时,由于白光 LED 能提供红、绿、蓝光 LED 光谱所缺少的琥珀段光谱,混合光的一般显色指数高达 93.3。随着蓝光和绿光 LED 占空比的增大,色温逐渐增加,一般显色指数缓慢增长到 95。白光 LED 的加入能使混合光的光谱趋于完整,因此,当把一般显色指数最大作为优化目标时,调光过程中白光 LED 对应占空比保持为 100%,如图 3 所示。随着色温的增加,

红光的占空比出现下降,而蓝光和绿光的占空比逐渐增加,由于蓝光LED的峰值波长远离555 nm,光效较低,随着蓝光LED占空比的增加,整体光效逐渐降低。整体而言,RGBW光源模块在一般显色指数最大的优化目标下表现出非常优异的显色性能。

表2 设定值和测量值对比

Table 2 Contrast relationship between set and measured value

Set CT/K	Measured CT/K	Relative error of CT /%	Set x	Measured x	Set y	Measured y	Set R_a	Measured R_a
2703	2680	-0.85	0.4595	0.4610	0.4105	0.4100	57.9	57.0
3030	3007	-0.76	0.4347	0.4367	0.4033	0.4044	77.1	75.9
3571	3531	-1.12	0.4013	0.4026	0.3887	0.3871	93.4	93.3
4000	3997	-0.08	0.3804	0.3804	0.3767	0.3762	93.8	93.7
4545	4550	0.11	0.3591	0.3589	0.3624	0.3613	94.3	94.2
5000	4992	-0.16	0.3450	0.3453	0.3516	0.3510	94.5	94.3
5556	5565	0.16	0.3311	0.3310	0.3399	0.3385	94.2	94.0
6250	6233	-0.27	0.3176	0.3179	0.3275	0.3275	94.5	94.3
7143	7171	0.39	0.3045	0.3042	0.3146	0.3144	94.7	94.9
7692	7712	0.26	0.2982	0.2978	0.3081	0.3087	94.9	95.0

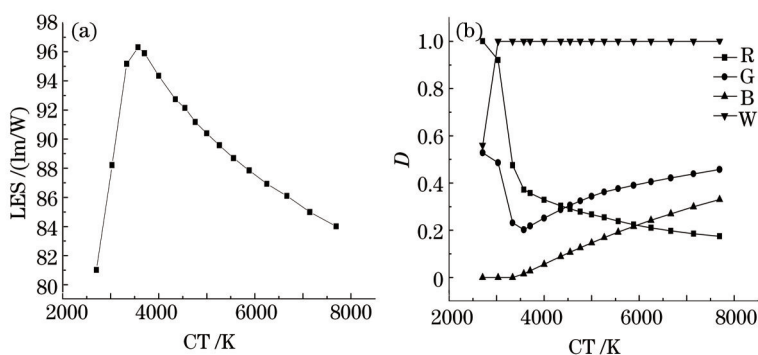


图3 R_a max 优化目标下(a)光效及(b)占空比随色温的变化

Fig.3 (a) LES and (b) duty cycle versus color temperature under condition of R_a max

3.2.2 光效最大

混合光的整体光效由各色LED的光效及占空比决定。虽然不同占空比组合可以实现相同的色品坐标,但对应的光效却不同。为了研究光源模块的最大光效,需要对整体光效进行多元约束条件下的寻优,既在(6)式及占空比小于100%的约束条件下,通过Fmincon函数求解方程 $f(D_r, D_g, D_b, D_w) = V_{LES}$ 的最大值及对应的占空比。沿黑体轨迹线,计算出色温范围为2703 K~7692 K白光的最大光效及对应的占空比,再将所求得的占空比输入信号发生器,进行实验验证,实验结果如表3和图4所示。

由表3可知,色温设定值和测量值的误差较小,相对误差在1.1%以内,由于色温越大对色品坐标的变化越敏感,因此色温误差随色温的增加呈现递增的趋势。多灯珠共同点亮时的结温大于单灯珠点亮时的结温,且LED的光效会随结温的增加而下降,因此实测光效小于预期光效。4000 K色温的混合光光效最大,结合图4可以发现,此时红、绿、蓝LED对应的占空比都接近0。这是由于白光LED的光效比单色LED的光效大,为了实现最大光效需要尽量降低单色LED的占空比,同时提高白光LED的占空比。当目标色温接近白光LED的色温时,只需极少量的单色LED参与混光即可实现目标色温的混合光,因此4000 K色温混合光的光效最大。少量单色LED参与混光导致混合光的光谱功率分布与白光LED单独点亮时的相似,其一般显色指数得不到显著提高,如图4所示。当混合光的色温大于4000 K,一般显色指数随蓝、绿LED占空比的增加而增大,然而除了3200 K~3500 K色温段混合光的显色性能较好,其余色温段混合光的一般显色指数都小于85。整体而言,以光效最大作为优化目标,混合光的高光效是通过降低显色性能实现的。值得注意的是,低

光效的单色 LED 参与混光会降低整体光效。同时,实验采用的白光 LED 的光效偏小。两者共同导致在光效最大优化目标下实现的混合光光效仅为 108 lm/W。对此,采用高光效的 LED 作为实验光源将有助于提高调光过程中的整体光效。

表 3 设定值和测量值对比

Table 3 Contrast relationship between set and measured

Set CT/K	Measured CT/K	Relative error of CT /%	Set x	Measured x	Set y	Measured y	Set LES /(lm/W)	Measured LES /(lm/W)
2703	2680	-0.85	0.4595	0.461	0.4105	0.4100	82.24	81.02
3030	3007	-0.76	0.4347	0.4367	0.4033	0.4044	88.89	88.21
3571	3537	-0.95	0.4013	0.4026	0.3887	0.3878	102.16	101.06
4000	3995	-0.13	0.3804	0.3804	0.3767	0.3758	108.04	106.33
4545	4595	1.10	0.3591	0.3575	0.3624	0.3611	106.93	105.24
5000	5016	0.32	0.345	0.3448	0.3516	0.3529	103.11	101.75
5556	5602	0.83	0.3311	0.3302	0.3399	0.3398	99.40	98.34
6250	6290	0.64	0.3176	0.3166	0.3275	0.3295	95.80	94.96
7143	7211	0.95	0.3045	0.3032	0.3146	0.316	92.29	91.61
7692	7748	0.73	0.2982	0.2972	0.3081	0.3091	90.59	89.98

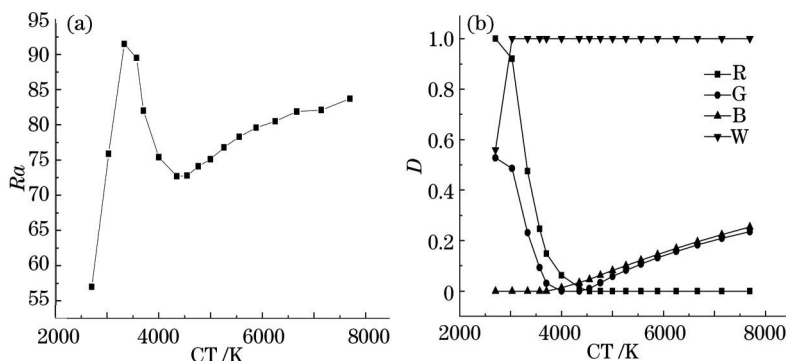


图 4 LES max 最大优化目标下(a)一般显色指数及(b)占空比随色温的变化

Fig.4 (a) Ra and (b) duty cycle versus color temperature under condition of LES max

3.2.3 显色性能与光效同时优化

从上文的实验可知,以 LES max 或 Ra max 为优化目标实现的混合光不能同时兼顾光效和显色性能。从图 5 可知,以 Ra max 作为优化目标实现的混合光虽然一般显色指数可以达到 95,但其光效与 LES max 作为优化目标实现的混合光的光效最大相差 14.1 lm/W 。以 LES 作为优化目标实现的混合光虽然可以达到 108 lm/W 的光效,但其一般显色指数与 Ra max 作为优化目标实现的混合光的显色指数最大相差 21.6。为了使混合光兼顾高显色性能和高光效,需要对一般显色指数和光效同时进行优化,对于显色性能优异的混合光可以通过降低显色性能以增加光效,重新定义寻优方程:

$$f(D_r, D_g, D_b, D_w) = V_{\text{LES}} (\text{under condition of } Ra \geq x), \quad (11)$$

式中 x 为 90 或 85,既增加 $Ra \geq x$ 作为约束条件,对光效进行寻优,其模拟结果如图 6 所示。对于光效优异的混合光则可以通过降低光效来提高显色性能,重新定义寻优方程为: $f(D_r, D_g, D_b, D_w) = Ra$ (under condition of $V_{\text{LES}} = V_{\text{LES}x}$), 为研究不同光效约束条件下一般显色指数的变化,在 Ra max 和 LES max 优化目标下测得光效曲线之间按递增规则重新设定三条光效曲线,并定义为 $\text{LES}x$,再根据设定的光效曲线计算对应的最大一般显色指数及占空比,对 $\text{LES}x$ 的描述及模拟结果如图 7 所示。

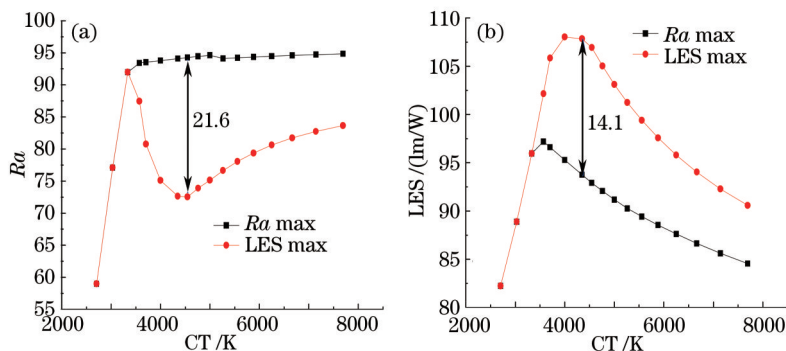


图5 Ra max和LES max优化目标下(a)一般显色指数及(b)光效随色温的变化

Fig.5 (a) Ra and (b) LES versus color temperature under condition of LES max and Ra max

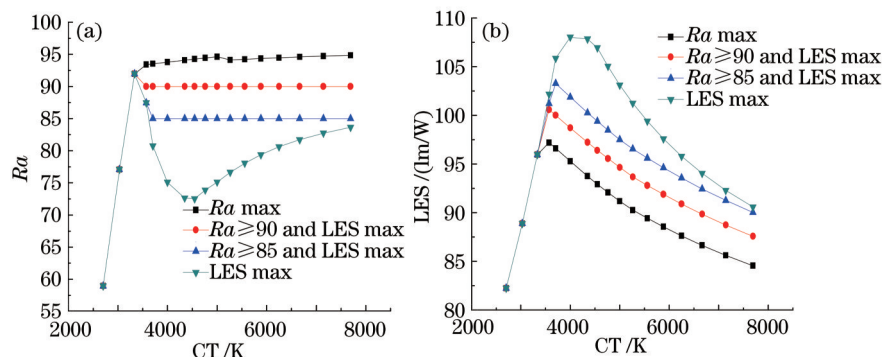


图6 $Ra \ge x$ 和LES max优化目标下(a)一般显色指数及(b)光效随色温的变化

Fig.6 (a) Ra and (b) LES versus color temperature under condition of $Ra \ge x$ and LES max

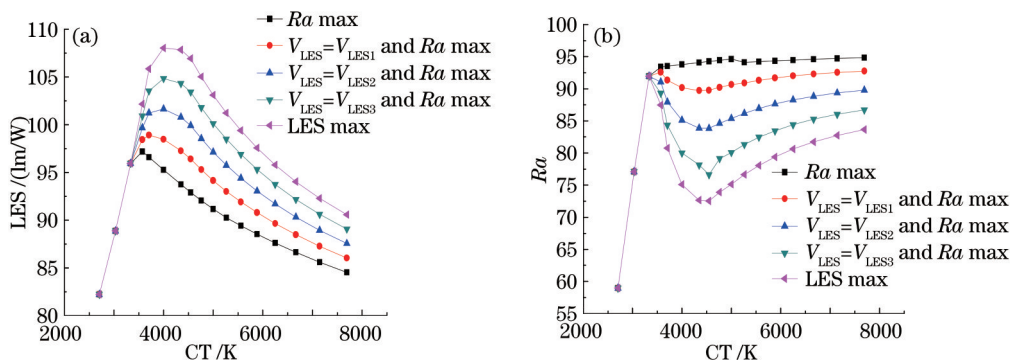


图7 $LES = LESx$ 和 Ra max优化目标下(a)光效及(b)一般显色指数随色温的变化

Fig.7 (a) LES and (b) Ra versus color temperature under condition of $LES = LESx$ and Ra max

由图6可知, Ra max优化目标下实现的混合光光效最低, LES max优化目标下混合光的光效最大, 随着对一般显色指数要求的降低, 混合光的光效相应地增加。在 $Ra \ge 90$ 和LES max优化目标下, 不仅混合光的 Ra 可以达到90, 而且其光效有明显地提高。实际应用中 $Ra \ge 75$ 的光源即可满足大部分场所的用光需求, 通过降低显色性能提高光效的方法具有实际意义。同理, 也可通过降低光效来提高显色性能, 由图7可知, 随着光效曲线由高光效向低光效递减, 混合光的显色性能逐渐提高。当优化目标为 $V_{LES} = V_{LES1}$ 且 Ra max时, 混合光的一般显色指数保持在90以上。造成上述两种现象的原因是显色指数与光效的矛盾性。混合光的显色指数由光谱功率分布决定, 高显色指数要求混合光的光谱功率分布较为连续, 需要位于不同波段的单色LED都参与混光, 而低光效的单色LED参与混光会使整体光效下降。此外, 由于白光LED的光效大于单色LED, 为了提高混合光的光效, 应该尽量减少单色LED的占空比而提高白光LED的占空比, 而单色光的缺少会导致显色指数的降低。因此, 对于混合光的光效和显色指数, 一者的提高以另一者的降低为代价。综上所述, 对于RGBW光源模

块,通过平衡光效和显色性能,可以实现一般显色指数大于90且具有高光效的可调色温白光,在实际运用中具有重要意义。

4 结 论

从RGBW四色混光方程组的不定解出发,借助Matlab软件对混光效果进行多元约束条件下的最优化计算。经实验发现:当一般显色指数最大作为优化目标时,不仅可以实现2700 K~7600 K色温范围的混合光,而且其一般显色指数高达95。在光效最大的优化目标下可以实现108 lm/W的高光效。由于光效和显色指数的矛盾性,单独对一般显色指数或光效进行优化会导致另一个参数偏低。因此,本文提出对光效和一般显色指数同时进行寻优,模拟实验结果发现,将一般显色指数限定在90或85可以显著提高光效,适当地降低光效可以实现一般显色指数大于90的混合光。运用上述方法,不仅可以根椐用光需求调节光源的色温,还可以对显色指数和光效进行控制,具有广泛的实用价值。需要注意的是,单色LED光谱的半峰全宽与峰值波长以及白光LED的光效和显色性能都会对最终混合光的一般显色指数与光效产生影响,该问题有待进一步地研究。

参 考 文 献

- 1 Krames M R, Shchein O B, Mueller-Mach R, *et al.*. Status and future of high-power light emitting diodes for solid-state lighting[J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(2): 160-175.
- 2 Chien-Hung Yeh, Yen-Liu, Chi-Wai Chow. Real-time white-light phosphor-LED visible light communication (VLC) with compact size[J]. *Opt Express*, 2013, 21(22): 26192-26197.
- 3 Su Chen, Chen Guichu, Zheng Shuwen, *et al.*. Response characteristic of blue light-emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0623002.
苏 晨, 陈贵楚, 郑树文, 等. 蓝光发光二极管的响应特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0623002.
- 4 Berson D M, Dunn F A, Motoharu Takao. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock[J]. *Science*, 2002, 295(5557): 1070-1073.
- 5 L Bellia, F Bisegna, G Spada. Lighting in indoor environments: visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(10): 1984-1992.
- 6 Xu Daisheng, Chen Xiao, Zhu Xiang, *et al.*. A dimming lightings 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.
- 7 Yin Luqiao, Yang Weiqiao, Li Shushi, *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.
殷录桥, 杨卫桥, 李舒智, 等. 基于三基色的动态色温白光发光二极管照明光源[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0523004.
- 8 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.
- 9 Wei Qifeng, Chen Chanying, Li Longliang, *et al.*. Investigation on realization of color temperature tunable with white light LED[J]. *Research & Progress of SSE*, 2013, 33(4): 359-362.
魏其锋, 陈长纓, 李龙亮, 等. 一种实现色温可调白光LED的方法研究[J]. *固体电子学研究与发展*, 2013, 33(4): 359-362.
- 10 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, 陈长纓, 张 浩, 等. 基于红白蓝模式色温可调的LED照明系统[J]. *固体电子学研究与发展*, 2014, 34(2): 163-169.
- 11 Ingo Speier, Marc Salsbury. Color temperature tunable white light LED system[C]. *SPIE*, 2006, 6337: 63371F.
- 12 Liu Zulong, Guo Zhengning, Hu Zhiwei, *et al.*. Effect of dimming on LED color temperature and luminous flux[J]. *Journal of Huaqiao University(Natural Science)*, 2013, 34(1): 14-17.
刘祖隆, 郭震宁, 胡志伟, 等. 调光方式对LED色温和光通量的影响[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(1): 14-17.
- 13 MooWhan Shin, Sun Ho Jang. Thermal analysis of high power LED packages under the alternating current operation[J]. *Solid-State Electronics*, 2012, 68: 48-50.

- 14 Tan Li, Liu Yuling, Yu Feihong. Method for 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.
- 15 Yu Jianhua, Chen Riguang, E Lei, *et al.*. Experimental study on tunable color temperature with high color rendering index[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(3): 395-401.
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): 395-401.
- 16 Huan-Ting Chen, Siew-Chong Tan, S Y Hui. Color variation reduction of GaN-based white light-emitting diodes via peak-wavelength stabilization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3709-3719.
- 17 National Standardization Technical Committee. GB/T 5702-2003. Methods of Measuring the Color of Light Sources[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.
全国标准化技术委员会. GB/T 5702-2003. 光源显色性评价方法光源显色性评价方法[S]. 北京, 中国标准出版社, 2003.
- 18 Zhong Wenjiao, Wei Aixiang, Zhao Yu. Dependence of GaN-based white LED colorimetric parameters on junction temperature[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(9): 1203-1207.
钟文姣, 魏爱香, 招 瑜. 结温对GaN基白光LED光学特性的影响[J]. 发光学报, 2013, 34(9): 1203-1207.
- 19 Yin Luqiao, Weng Fei, Song Peng, *et al.*. Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0323002.
殷录桥, 翁 菲, 宋 朋, 等. LED芯片与YAG荧光粉的相互热作用[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0323002.

栏目编辑: 韩 峰