

基于三基色的动态色温白光发光二极管照明光源

殷录桥^{1,2,3} 杨卫桥³ 李抒智³ 程 备^{1,2} 张建华^{1,2}

¹ 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072
² 上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072
³ 上海半导体照明工程技术研究中心, 上海 201203

摘要 照明光源的灯光质量对人体健康的影响受到了越来越多的关注。近几年伴随着大功率发光二极管发光效率的不断突破,已经达到甚至超过普通照明光源的发光效率。为进一步改善照明光源质量,通过色温的变化实现类太阳光色温变化的智能光源,采用红绿蓝三基色发光二极管,基于理论计算按照不同比例的三基色搭配,在实验中测试得到一个不同色温配比的数据库。并将数据库植入控制程序中,然后通过控制程序自动调取不同配比,最终实现不同时间段色温动态变化的照明光源。实验结果表明,本照明光源可以实现从 2300~7000 K 的宽色温范围,实际色温与理论计算相符,基本实现了类太阳光动态色温变化趋势。

关键词 光电子学;动态色温;三基色配光;照明光源;发光二极管

中图分类号 TM923.34 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0523004

Dynamic Color Temperature White Lighting Source Based on Red Green and Blue Light Emitting Diode

Yin Luqiao^{1,2,3} Yang Weiqiao³ Li Shuzhi³ Cheng Bei^{1,2} Zhang Jianhua^{1,2}

¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China
² Key Laboratory of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China
³ Shanghai Research Center of Engineering and Technology for Semiconductor Lighting, Shanghai 201203, China

Abstract More and more attentions have been focused on the lighting source as it plays an important role to people's health. The light emitting efficiency of light emitting diode has been broken through year by year and now it has been surpassed that of the traditional lighting source. In order to improve the lighting quality by a lighting source with flexible color temperature, a data base is created with different color temperature by mixing different proportion luminous flux of red, green and blue light emitting diode based on theoretical calculations. The data base is embedded into the control program and it can run different proportion to realize light source variation with color temperature at different time. The experimental results show that the lighting source can realize correlated color temperature from 2300~7000 K, real color temperature is in accordance with that of theoretical calculation. Thus a sunlight-style lighting device is realized fundamentally.

Key words optoelectronics; dynamic color temperature; tricolor light mixing; lighting source; light emitting diode

OCIS codes 230.0250; 230.3670; 220.2945

收稿日期: 2010-07-14; **收到修改稿日期**: 2011-01-27

基金项目: 教育部新世纪优秀人才项目(NCET-07-0535)、上海市启明星跟踪计划项目(08QH14007)和上海市科委半导体照明专项计划(08DZ1140603,09DZ1141502,09DZ1140300)资助课题。

作者简介: 殷录桥(1983—),男,博士研究生,主要从事大功率多芯片 LED 集成封装热学方面的研究。

E-mail: skd2001@163.com

导师简介: 张建华(1972—),女,博士,研究员,主要从事大功率 LED 先进封装与可靠性、半导体工艺与装备、TFT OLED 新型显示集成制造技术、摩擦学与仿生润滑等方面的研究。E-mail: jhzhang@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

荧光灯作为照明史上的一次革命,是目前照明光源的主流灯具,但其颜色单调,同时有频闪和汞污染等问题。而半导体照明是 21 世纪最具发展前景的新一代绿色照明光源,其节能、环保和寿命长等优点,顺应了时代发展的潮流,引起全球性的高度重视。随着半导体发光二极管(LED)芯片及封装工艺水平的不断提高,加上大功率 LED 封装和应用技术的成熟,LED 的发光效率得到了大大提高。目前 LED 光源在节能、环保和长寿命等各方面均占绝对优势,而且已有相当多的研究应用,如 LED 在情景照明方面的应用^[1]及红绿蓝(RGB)白光 LED 光源研究^[2,3]。随着生活质量的提高,人们对照明舒适度、自身健康的关注度也在不断提高,LED 光源自身的优势正好可以满足以上需求,如动态色温、高显色性和智能亮度调节等。

照明环境与人体生物节律有直接的影响,如人体分泌的褪黑素,可以促进睡眠,但是褪黑素的分泌直接受光照影响。白天,强光线抑制了褪黑素的分泌,从而保持工作状态,而在夜晚,没有了强光的抑制,褪黑素的分泌促进了睡眠。目前各种人工光源与自然光源存在一定差距^[4],研究表明,照明光源对人体生物生理与心理具有明显的影响作用,如适当的调节光照环境,可以改善人的对光环境感觉的舒适度、改善因温度的变化引起的人对光源的不适^[5]。光源的色温对生物节律及人的情绪有影响^[6,7],高色温的光源会提高大脑活跃度,让人注意力集中,缺点是不利于大脑疲劳的恢复^[8]。色温对人体体温也有影响,在外界条件如环境温度变化时,不同的光照色温对体温下降有不同的影响^[9]。因此如何通过实现合理配光,来实现控制人体褪黑素的分泌是一个关键。体现在 RGB 光源中,即需要实现不同色温的 LED 光源。光源色温的计算方法及评价方法已有相关研究^[10,11],而且基于二分法的 RGB LED 快速配光模型也有研究^[12],准确度都比较高,本文实现的光源色温允许一定误差,所以直接通过普朗克黑体线来查找相应色温对应色坐标,简单易行。

2 理论计算

设所要配出的白光色坐标为 $W(x_w, y_w)$,使用的三原色 R, G, B 色坐标分别为 $R(x_r, y_r), G(x_g, y_g), B(x_b, y_b)$,相应的三刺激值分别为 $(X_w, Y_w, Z_w), (X_r, Y_r, Z_r), (X_g, Y_g, Z_g), (X_b, Y_b, Z_b)$,光通量分别

为 l_w, l_r, l_g, l_b 。根据格拉斯曼颜色混合定律及 1931 国际发光明委员会(CIE)标准^[13-15]:

$$\begin{cases} X_w = X_r + X_g + X_b \\ Y_w = Y_r + Y_g + Y_b \\ Z_w = Z_r + Z_g + Z_b \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_w = \frac{X_w}{X_w + Y_w + Z_w} \\ y_w = \frac{Y_w}{X_w + Y_w + Z_w} \\ z_w = 1 - x_w - y_w \end{cases}. \quad (2)$$

1931 CIE 标准规定, X, Z 两色只代表色度,没有亮度,光度量只与三刺激值 Y 成比例,则三刺激值用亮度和色度表示为

$$\begin{cases} X_r = \frac{x_r}{y_r} l_r, & Y_r = l_r, & Z_r = \frac{z_r}{y_r} l_r \\ X_g = \frac{x_g}{y_g} l_g, & Y_g = l_g, & Z_g = \frac{z_g}{y_g} l_g \\ X_b = \frac{x_b}{y_b} l_b, & Y_b = l_b, & Z_b = \frac{z_b}{y_b} l_b \\ X_w = \frac{x_w}{y_w} l_w, & Y_w = l_w, & Z_w = \frac{z_w}{y_w} l_w \\ l_w = l_r + l_g + l_b \end{cases} \quad (3)$$

联立(1)~(3)式整理得

$$\begin{pmatrix} \frac{x_w}{y_w} \\ \frac{1}{y_w} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_r}{y_r} & \frac{x_g}{y_g} & \frac{x_b}{y_b} \\ \frac{1}{y_r} & \frac{1}{y_g} & \frac{1}{y_b} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_r \\ l_g \\ l_b \end{pmatrix}. \quad (4)$$

实验中 R, G, B 三基色 LED 芯片,其主波长分别为: $\lambda_{DR} = 640.6 \text{ nm}, \lambda_{DG} = 537.1 \text{ nm}, \lambda_{DB} = 462.9 \text{ nm}$,通过光电设备(远方 HAAS-2000)可以直接测得三种芯片的色坐标,如表 1 所示。

表 1 实验中 R, G, B 三基色 LED 芯片色坐标
Table 1 Chromatic coordinate of the red, green and blue light emitting diode in the experiment

	x	y	x/y	$1/y$
R	0.7184	0.2807	2.5593	3.5625
G	0.2265	0.7069	0.3201	1.4146
B	0.1441	0.0422	3.4147	23.6967

计算中取暖色、正白、冷色三种色调, $T = 2300 \text{ K}$ (暖色), $T = 3000 \text{ K}$ (暖色), $T = 5000 \text{ K}$ (正色), $T = 6500 \text{ K}$ (冷色), $T = 7000 \text{ K}$ (冷色) 5 个色温点,以上几种色温在黑体线上对应相应色温的色坐标如表 2 所示。

将表 1, 表 2 数据同时代入(4)式,通过计算得到 5 种色温下 R, G, B 三基色 LED 配比不同色温的

白光时光通量的比例,如表 3 所示。

表 2 选取的色温在黑体线上对应的色坐标

Table 2 Chromatic coordinate of the correlated color temperature on Planck radiation curve

	x	y	x/y	$1/y$
2300 K	0.495	0.415	1.1928	2.4096
3000 K	0.436	0.40375	1.0799	2.4768
5000 K	0.3451	0.3516	0.9815	2.8441
6500 K	0.3135	0.3237	0.9685	3.0893
7000 K	0.306	0.316	0.9684	3.1646

表 3 理论计算得到的不同色温下 R,G,B 的光通量比例
Table 3 Luminous flux proportion of red, green and blue LED at different correlated color temperature by theoretical calculation

	2300 K	3000 K	5000 K	6500 K	7000 K
I_r	0.378	0.315	0.238	0.214	0.209
I_g	0.613	0.667	0.720	0.731	0.733
I_b	0.008	0.0173	0.0412	0.0545	0.0584

表 4 不同色温的数据库

Table 4 Data-base of different correlated color temperature

	2300 K			3000 K			5000 K			6500 K			7000 K		
	I_r	I_g	I_b	I_r	I_g	I_b	I_r	I_g	I_b	I_r	I_g	I_b	I_r	I_g	I_b
Low luminous flux /lm	18.52	30.01	0.4	9.14	19.33	0.5	5.79	17.5	1	4.72	16.1	1.2	5	17.56	1.4
Low current /mA	115	47.6	2.9	57.5	33.6	3.4	37.1	31.2	6	31.1	29.8	7	32.9	31.8	8
Measured CCT /K	2304			3000			5030			6432			6988		
Middle luminous flux /lm	27.78	45.02	0.6	18.28	38.66	1	11.59	35	2	9.83	33.54	2.5	10.01	35.13	2.8
Middle current /mA	189.4	66.9	4	116.3	58.5	6.1	77.6	55.1	11	65.7	51.9	13.6	63.5	53.7	15.2
Simulated CCT	2311			3019			5001			6491			7018		
Measured CCT /K	2272			3056			4989			6473			7028		
High luminous flux /lm	55.55	90.04	1.2	36.55	77.31	2	23.17	70	4	19.65	67.08	5	21.45	75.27	6
High current /mA	441.6	131.8	7.1	259.7	113.1	11.1	161	99.5	21.4	140	97.5	26.7	161.7	107.7	32.4
Measured CCT /K	2295			3094			5013			6554			7073		

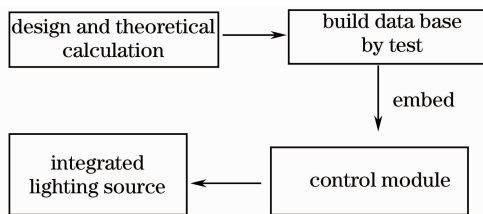


图 1 驱动控制简图

Fig.1 Driver control chart

3 实验及结果讨论

实验对象为在一个制作好线路的铝基板 (36 mm×40 mm)中间,封装 RGB 三基色大功率 LED,其主波长分别为: $\lambda_{DR} = 640.6 \text{ nm}$, $\lambda_{DG} = 537.1 \text{ nm}$, $\lambda_{DB} = 462.9 \text{ nm}$,其中 B,R 和 G 三种 LED 分别为 4 颗,4 颗,8 颗,共 16 颗。根据理论计算结合表 3,每种色温下分别按照计算得到的比例配比三种不同亮度下对应的光通量数据。实验中通过积分球光电测试系统(远方 HAAS-2000)分别测试不同配比下 R,G,B 三基色对应光通量的电参数,汇总后数据库如表 4 所示。(其中光通量为根据计算比例选取)

如表 4 所示,将不同色温对应的不同亮度的电流值,植入控制电路内,通过电流的控制,结合定时功能,实现不同时间不同的色温,及相同色温对应的不同亮度,驱动控制简图如图 1 所示。

集成的照明模块可以根据需要实现不同色温的光照,并可以根据使用环境的明暗情况实现亮暗调节,实现智能光源。

实验按照 4 个芯片一组排成一个 2×2 图形布局,每个光源模块有 4 组这样相同的组合,一共 16 个大功率 LED 芯片,如图 2 所示。

图 2 为设计的 4 种 LED 芯片布局图,在同样的色温 6500 K($R:9.83 \text{ lm}$, $G:33.54 \text{ lm}$, $B:2.5 \text{ lm}$)下,

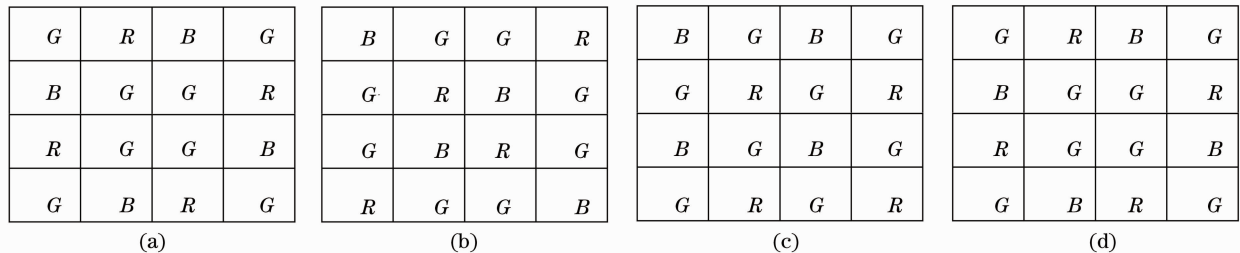


图 2 LED 芯片布局设计

Fig.2 Layout of the LED chip

通过光学软件模拟其光学性能,得到性能参数如表 5 所示。

根据表 5 及图 3 综合对比,图 2(c)方案在照度

标准偏差、色差均匀性方面相对于其他三种方案较高,为了得到较为均匀的照明效果,本设计选取了图 2(c)芯片布局方案。

表 5 LED 芯片不同布局模拟参数

Table 5 Simulation parameters of different LED layout

	(a)	(b)	(c)	(d)
Correlated color temperature	6527	6554	6483	6500
Illumination mesh standard deviation	4.4	2.87	2.78	3.38
Color rendering index	35.5	34.3	34.7	34.6

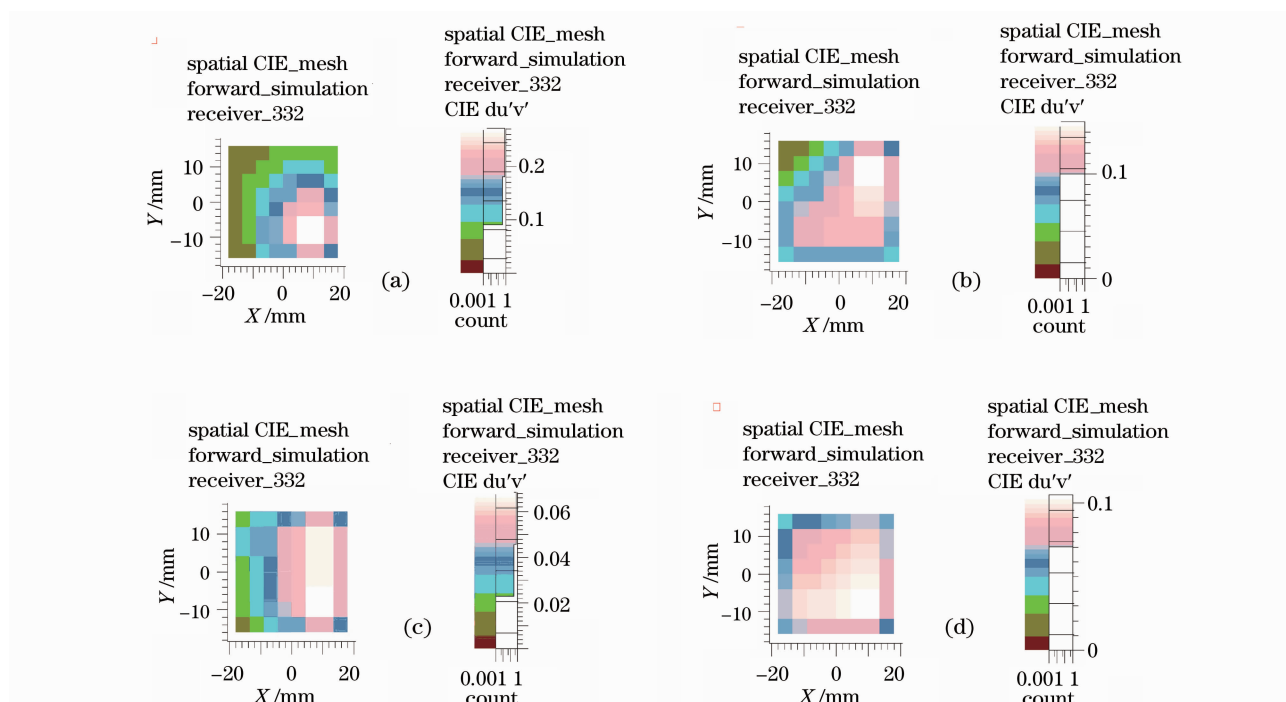


图 3 不同 LED 芯片布局的色差

Fig. 3 Chromatic aberration of different LED chip layout

图 4 为芯片间距与色差标准偏差的关系变化曲线,通过图 4 可以发现,随着 LED 芯片间距的增加,光源色差的标准偏差逐渐增加,在工艺允许的情况下本实验尽可能的选择了 LED 芯片间距较小的排布方式,方案中 LED 间距为 1.95 mm。

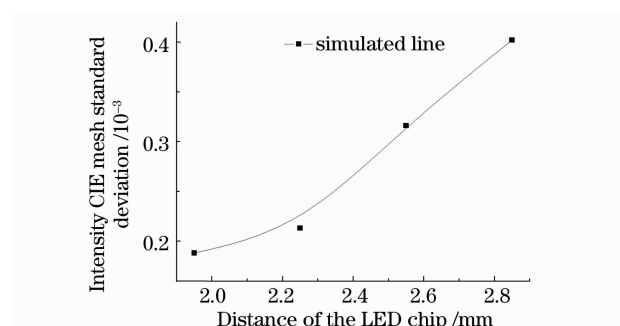


图 4 芯片间距与色差标准偏差的关系

Fig. 4 Relation between chromatic aberration standard deviation and LED chip distance

图 5(a)为芯片布局实物图,图 5(b)~(d)为 RGB 智能光源实现的不同光照色调。

图 6 为不同色温、不同亮度下按照理论计算配比的智能光源色坐标在色坐标图上的分布,通过图 6 可以看到,不同色温、不同亮度下智能光源的色坐标基本都在黑体线参考色温点色坐标附近,证明了理论计算与实际测试相吻合。

图 6 中 3094 K(黑体线外一个点)实测点位于黑体线外部,现在将该点 R, G, B 三种颜色的光实测数据重新代入(4)式为例分析其与表 3 中 3000 K RGB 三基色理论计算的差异性,结果如表 6 所示。

通过表 6 可以发现,实际测试中位于黑体线外部的色坐标点,通过(4)式计算,RGB 三基色的比例跟表 3 的原始计算比例接近,即表 6 中测试光通量与理论计算光通量比较接近。表明黑体线以外的色坐标点与光通量的关系仍然满足(4)式的关系,偏离黑体线的误差是来自 RGB 三基色实际光通量与理

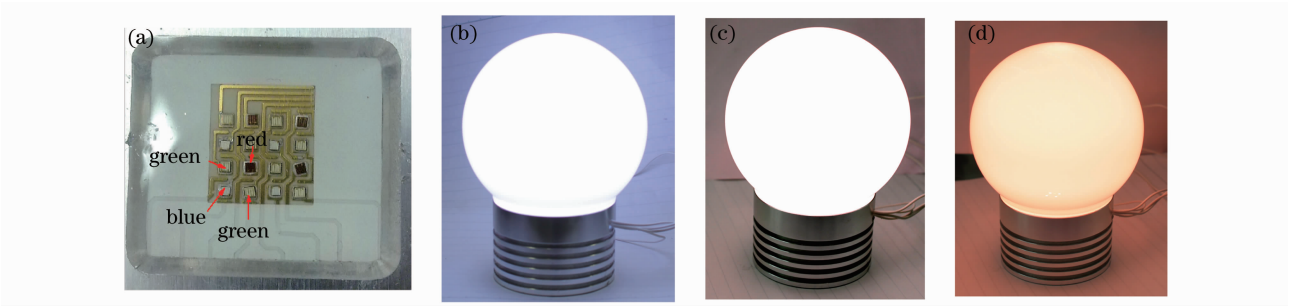


图 5 集成的智能光源实际色调。(a)芯片布局,(b)冷色调,(c)中性色调,(d)暖色调

Fig. 5 Actual color tone of the integrated intelligent light source. (a) Chip layout, (b) cool tone, (c) neutral tone, (d) warm tone

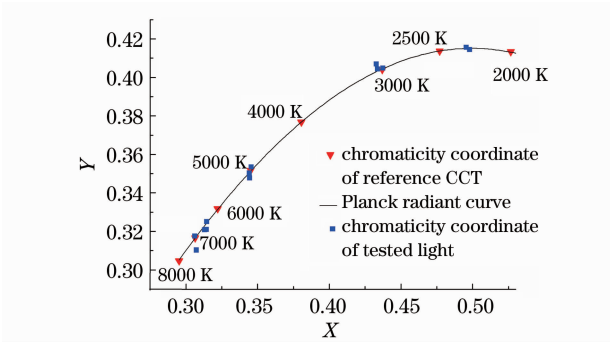


图 6 光源测试色坐标在色坐标图上的分布

Fig. 6 Tested chromaticity coordinate of the light source distributed on the chromaticity coordinate diagram

论光通量的偏差。

表 7 为对 RGB 光源在 6500 K 色温附近工作时发光均匀性测试的参数。对发光光源外壳直径最大处 360°均匀的取 8 个测试点,采用亮度计测试设备(美国 Photo Research PR-650)对其进行亮度、色坐标、显色性进行测试,测试结果如表 7 所示,通过表 7 标准偏差可以发现,测试结果较为均匀。

图 7 为实际测试不同色温下的显色指数与软件模拟结果的对比,通过对比结果可以发现,随着色温的升高,RGB 光源的显色性会逐渐升高,测试结果与模拟结果反映的趋势性一致。图 7 的结果还表明此 RGB 光源在高色温下显色指数比低色温时显色性高。

表 6 实际测试点(3094 K)与理论计算相关参数对比

Table 6 Comparison between measured parameters(3094 K)and theoretical calculation

	Red LED	Green LED	Blue LED	White LED
x	0. 7182	0. 2193	0. 144	0. 4328
y	0. 2805	0. 7093	0. 0428	0. 4069
Proportion calculated by measured chromatic coordinate	0. 312	0. 671	0. 0171	
Measured luminous flux /lm	36. 08	78. 46	2. 01	
Proportion of theoretical calculation	0. 315	0. 677	0. 0173	
Theoretical luminous flux /lm	36. 55	77. 31	2	

表 7 光源均匀性测试

Table 7 Uniformity test of the light source measurement

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	Standard deviation
Luminance /(cd/m ²)	987. 7	992. 9	995. 5	1027	1060	1080	1112	1066	46. 23
x	0. 3094	0. 3127	0. 3145	0. 3139	0. 3124	0. 3082	0. 3049	0. 3063	0. 00361
y	0. 3235	0. 3247	0. 3251	0. 3248	0. 3258	0. 3222	0. 32	0. 3206	0. 00218
Color rendering index	36	34	33	33	33	33	36	37	1. 685

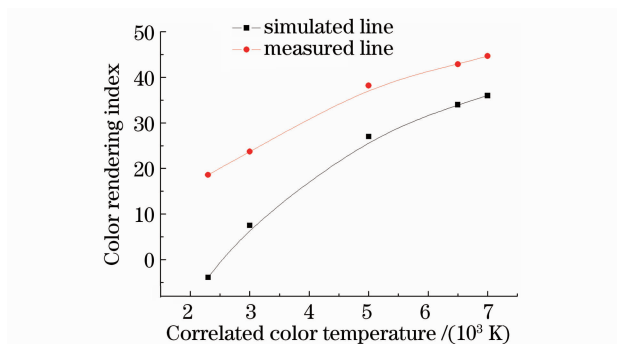


图 7 色温与显色指数的关系

Fig. 7 Relation between correlated color temperature and color rendering index

RGB 三基色配比色温过程中,三种颜色所占百分比有一定的变化趋势,随着绿光蓝光百分比的增加、红光百分比的下降,所配白光的色温逐渐升高,如图 8(a)所示。而由于 LED 芯片中 60% 以上的能量转换成了热量,而且 LED 的出光量与温度是一种

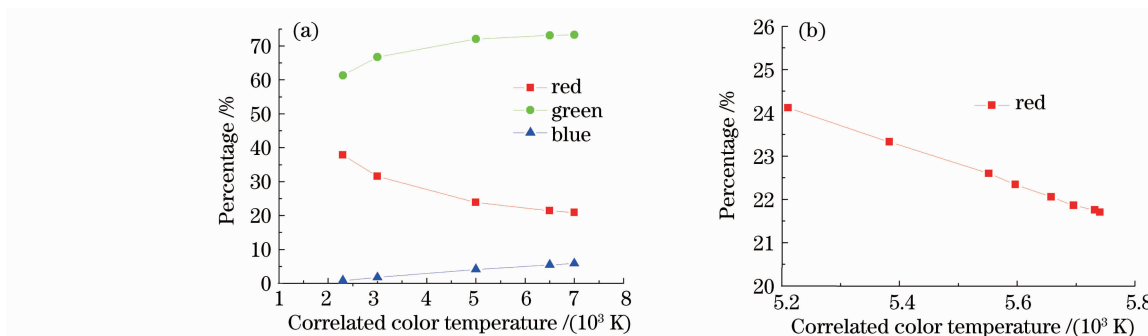


图 8 (a)光源色温与 RGB 三种颜色百分比关系,(b)温度非平衡状态下红光百分比与色温的关系

Fig. 8 (a) Relation between correlated color temperatures with luminous flux proportion of RGB LED, (b) relation between correlated color temperatures with luminous flux proportion of Red LED

4 结 论

本文集 RGB LED 芯片布局设计、理论计算、实验验证于一体,首先以得到不同光照色温下 R, G, B 三基色对应的光通量比例,并通过光学模拟软件对比几种不同的 LED 芯片布局,选取了一种均匀性略高的布局设计。然后通过测试设备测得对应光通量下的电流,将相应的数据库植入控制程序,通过控制程序控制 LED 光源在不同的时间出现不同的光照色温或者相同色温不同的亮度,得到了传统单一光源无法实现的光照环境,从而实现类太阳光的光照环境,以期改善人们的光照环境及工作环境。最后从热学方面对 RGB 白光 LED 色温发生变化进行了解释,为设计性能可靠的 LED 照明提供了参考。

函数关系^[16],当 LED 芯片结温过高时,俄歇复合是引起量子效率下降的主要原因,此相关系数为 $T^{0.6}$ ^[17]。因为俄歇复合率可以表达为 $R_{Aug} \propto N^3$,内量子效率表达成

$$\eta_{int} = R_{rad} / (R_{nr} + R_{rad}),$$

式中 N 是 LED 结区非平衡载流子浓度。 R_{rad} 是辐射复合率 R_{nr} 非辐射复合率,而且是在结温过高时在 R_{Aug} 中占绝对比率的部分^[18~21]。因此在其中个别 LED 芯片热平衡未稳定或者整个模块温度过高时,就会引起 16 个 LED 芯片中的个别芯片内量子效率降低,这时 LED 芯片的出光效率会降低,从而造成 RGB 三基色比例失衡,导致测试结果偏离黑体线,如图 8(b)所示,在温度没有达到平衡状态时,红光 R 光通量百分比从 24.1% 变化至 21.7% 时,白光 LED 色温从 5200 K 变化到 5700 K,因此 RGB 在设计时,需要充分考虑到温度的问题。

参 考 文 献

- Ledman Optoelectronic Co., Application of LED semiconductor light source in scene illumination [J]. *Advanced Display*, 2009, **20**(5): 57~61
深圳雷曼光电科技有限公司. LED 半导体照明光源在情景照明中的应用[J]. *现代显示*, 2009, **20**(5): 57~61
- Zhu Jun, Zhang He, Jing Guofan. A novel white light source based on RGB LED [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(6): 929~931
朱 钧, 张 鹤, 金国藩. 一种基于 RGB 三基色 LED 的白光光源[J]. *光学技术*, 2007, **33**(6): 929~931
- Guo Jing, Jin Shangzhong. Design for white light source based on RGB LED illumination module [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2009, **24**(1): 145~150
郭 靖, 金尚忠. RGB LED 白光照明单元的组合设计[J]. *液晶与显示*, 2009, **24**(1): 145~150
- Yao Qi, Ju Jiaqi, Cheng Wenting *et al.*. Discussion on the visual and non-visual biological effect of different light sources [J]. *China Illumination Engng. J.*, 2008, **19**(2): 14~19
姚 其, 居家奇, 程雯婷等. 不同光源的人体视觉及非视觉生物效应的探讨[J]. *照明工程学报*, 2008, **19**(2): 14~19

- 5 Liu Wei, Wang Xiaojing. The effect of illumination on physiology and psychology [J]. *Light and Lighting*, 2002, **26**(1-2): 31~34
刘 炜, 王晓静. 照明对人的生理与心理的影响[J]. 灯与照明, 2002, **26**(1-2): 31~34
- 6 Yang Shiguang. Human body and lighting [J]. *Light and Lighting*, 2000, **24**(5): 5~7
杨世光. 人体与光源 [J]. 灯与照明, 2000, **24**(5): 5~7
- 7 Peter R. Mills, Susannah C. Tomkins, Luc JM Schlangen. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance [J]. *J. Circadian Rhythms*, 2007, **5**(1): 2
- 8 Shi Lu. The effect of illumination source correlated color temperature on the physiological function of human body nervus centralis [J]. *Chinese J. Ergonomics*, 2006, **12**(2): 59~61
石 路. 照明光源色温对人体中枢神经生理功能的影响[J]. 人类工效学, 2006, **12**(2): 59~61
- 9 Shi Lu. The effect of lighting source correlated color temperature on biological rhythm and thermoregulation of human body [J]. *Chinese J. Ergonomics*, 2006, **12**(3): 53~55
石 路. 光源色温对人体生物节律和体温调节的影响[J]. 人类工效学, 2006, **12**(3): 53~55
- 10 Lin Yue, Ye Liewu, Liu Wenjie *et al.*. Optimization algorithm of correlated color temperature for LED light sources by dichotomy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2791~2794
林 岳, 叶烈武, 刘文杰 等. 二分法优化计算 LED 光源相关色温[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2791~2794
- 11 Dai Caihong, Yu Jialin, Yu Jing *et al.*. Uncertainty analysis of the colour temperature and the correlated colour temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 547~552
代彩红, 于家琳, 于 靖 等. 颜色温度和相相关色温的不确定度评定方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 547~552
- 12 Xu Shibo, Lü Yijun, Chen Huanting *et al.*. Color matching of RGB LEDs based on dichotomy [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, **24**(6): 7~10
徐示波, 吕毅军, 陈焕庭 等. 基于二分法的 RGB-LEDs 配色研究[J]. 光电技术应用, 2009, **24**(6): 7~10
- 13 Wang Ya' nan. Application Study on Illumination Quality Improvement of Tri-chromaticity White Light Emitting Diodes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. 16~23
王亚男. 三基色白光 LED 光源照明质量改善的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008. 16~23
- 14 Chen Peng. Development of a High-Power Full-Color LED Lighting Driver [D]. Jiangxi: Jiangxi Normal University, 2009. 11~17
陈 鹏. 大功率全彩色 LED 驱动电路的研制[D]. 江西: 江西师范大学, 2009. 11~17
- 15 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiation Intensity, Photometric and Chromaticity and Test [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. 112~129
金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007. 112~129
- 16 C. Biber. LED light emission as a function of thermal conditions [C]. IEEE, 2008; 180~184
- 17 K. G. Svantesson, N. G. Nilsson. The temperature dependence of the Auger recombination coefficient of undoped silicon [J]. *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 1979, **12**(23): 5111~5120
- 18 K. A. Bulashevich, S. Yu. Karpov. Is Auger recombination responsible for the efficiency rollover in III-nitride light-emitting diodes? [J]. *Phys. State Solidi (c)*, 2008, **5**(6): 2066~2069
- 19 Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe *et al.*. Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(14): 141101~141103
- 20 A. E. Chernyakov, M. M. Sobolev, V. V. Ratnikov *et al.*. Nonradiative recombination dynamics in defect system [J]. *Microstruct*, 2009, **45**(4-5): 301~307
- 21 Yin Luqiao, Yang Lianqiao, Yang Weiqiao *et al.*. Thermal design and analysis of multi-chip LED module with ceramic substrate [J]. *Solid-State Electronics*, 2010, **54**(12): 1520~1524