

# 实现色温自动控制的白光 LED 照明系统设计\*

李毓钦<sup>1,2\*\*</sup> 陈长缨<sup>1,2</sup> 王媛<sup>2</sup> 刘平宇<sup>1,2</sup> 魏其锋<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室,暨南大学,广州,510632) (<sup>2</sup>暨南大学光电工程系,广州,510632)  
2013-12-02 收稿,2013-12-23 收改稿

**摘要:** 荧光粉发光 LED 作为白光光源在照明领域有着广泛的应用。长时间工作,荧光粉发光 LED 将出现色温偏移现象。荧光粉发光 LED 的色温偏移与芯片衰减和荧光粉衰减有关。提出了一种能同时考虑芯片衰减和荧光粉衰减的数学模型。从理论上分析了芯片衰减和荧光粉衰减对荧光粉发光 LED 的色坐标及色温变化的影响。提出了一种利用蓝光 LED 与荧光粉发光 LED 混合,通过对蓝光 LED 进行负反馈控制,保证蓝光辐射在全白光中的辐射功率比值恒定,从而实现色温稳定的白光 LED 照明系统。

**关键词:** 光学设计;色温稳定;反馈控制;色品坐标

**中图分类号:** TN312+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2014)02-0157-06

## Design of Auto Control of Color Temperature for White-LED Lighting System

LI Yuqin<sup>1,2</sup> CHEN Changying<sup>1,2</sup> WANG Yuan<sup>2</sup> LIU Pingyu<sup>1,2</sup> WEI Qifeng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of

Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, 510632, CHN)

(<sup>2</sup> Department of Photoelectric Engineering, Jinan University, Guangzhou, 510632, CHN)

**Abstract:** Phosphor converted LED has extensive application in lighting field as white light source. After long time working, its output color temperature will be shifting, which is mostly caused by chip degradation and phosphor layer degradation. A mathematical model is proposed considering these two variables, and theoretical analysis is made for the dependence of color temperature and chromaticity coordinate on the degradation of phosphor converted LED including chip and phosphor. A new white LED lighting system, with mixed blue LED and phosphor converted LED is proposed to achieve stable color temperature, by the means of keeping the ratio of blue-ray radiation to the whole radiation constant through negative feedback.

**Key words:** optical design; stable color temperature; feedback control; chromaticity coordinates  
**EEACC:** 4260D

### 引言

作为新一代的照明光源,白光发光二极管(LED)因高效节能、绿色环保和长寿命等特点,广泛

应用于照明领域<sup>[1-2]</sup>。而 InGaN/GaN 基蓝光芯片+YAG:Ce<sup>3+</sup>黄色荧光粉的方式(Phosphor converted LED, PC-LED),是现今白光 LED 的主流方式<sup>[3-4]</sup>,具有很好的显色性。大部分照明光源都是单

\* 基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(11609506)

\*\* 联系作者:E-mail:liyujin\_jnu@163.com

一色温,但是由于 PC-LED 的长时间工作,会导致原本单一色温发生色温偏移<sup>[3-5]</sup>,这种色温偏移是由于 LED 自身老化造成的。在一些特定场合的照明方面,稳定的色温是人们所期望的,例如:门诊检查室、博物馆<sup>[6]</sup>等特定环境的照明,因此色温恒定的光源在照明领域具有很好的应用前景。目前,白光 LED 实现色温调控的方法主要有:(1)采用红、绿、蓝三种颜色的 LED 混合<sup>[7]</sup>;(2)采用暖白色 LED 与红色 LED、蓝色 LED 混合<sup>[8]</sup>;(3)通过对各颜色的亮度控制实现色温调控。以上实现方法仅从色温的配色角度出发,没有考虑 LED 内在的衰减机制,在长时间工作后,仍存在色温偏移的问题。

文中基于对 PC-LED 的衰减机制的理论分析,在考虑芯片衰减和荧光粉衰减的条件下,提出了 PC-LED 色坐标的数学模型。从理论上分析了芯片衰减和荧光粉衰减对荧光粉发光 LED 的色坐标及色温变化的影响。提出采用 PC-LED 和蓝光 LED 这两种 LED 混合,通过负反馈控制,保证蓝光辐射与全白光的比例恒定,从而获得一种通过自动控制实现色温稳定的白光 LED 照明系统。

## 1 设计原理

### 1.1 荧光粉发光 LED 衰减机制分析

白光 LED 通常采用两种方法产生:第一种是基于蓝光芯片与荧光粉的组合发光(PC-LED);第二种是通过多种单色光混合的方法。其中,照明领域通常采用蓝光芯片与荧光粉组合发光,文中基于该种发光机制进行讨论分析。荧光粉随着白光 LED 使用时长的增加,将出现不同程度的老化,从而引起色温的偏移。荧光粉 LED 的衰减主要由两个方面引起:1. 蓝光芯片的老化,有源区中非辐射复合中心的增多,导致蓝光芯片发光效率降低<sup>[5,9-12]</sup>;2. 荧光粉退化,由于蓝光芯片工作时一直处于很高的温度,荧光粉在高温的环境下被激发,容易导致荧光粉活性降低,对蓝光的吸收量减少,从而导致投射出的蓝光辐射有所增加而黄光辐射有所减少<sup>[5,13-16]</sup>。

PC-LED 具有独特的光谱功率分布曲线 (SPD),部分窄波长范围的蓝光辐射激发荧光粉,转换为宽波长范围的黄光辐射,其余蓝光辐射溢出封装物质。为了研究 LED 的发光特性,国内外研究人员提出多种 LED 光谱数学模型<sup>[17-18]</sup>,高斯模型(G-model)是众多研究者首选的 LED 光谱模型。基于 G-model,可将 PC-LED 用两个高斯函数,分别是溢

出的蓝光辐射和激发的黄光辐射。其 SPD 可以表示为:

$$\Phi_w(\lambda) = \Phi_B(\lambda) + \Phi_Y(\lambda) \quad (1)$$

其中, $\Phi_w(\lambda)$ 、 $\Phi_B(\lambda)$ 、 $\Phi_Y(\lambda)$ 分别代表 PC-LED、溢出蓝光辐射、受激发黄光辐射的光谱功率分布函数。考虑 PC-LED 的衰减随时间变化关系,引入时间因子,可将(1)式改进为:

$$\Phi_w(\lambda, t) = \Phi_B(\lambda, t) + \Phi_Y(\lambda, t) \quad (2)$$

蓝光芯片的衰减,可表示为衰减随时间的变化关系,引入蓝光芯片的衰减系数  $\eta_c(t)$ ;同理,引入荧光粉的衰减系数  $\epsilon_p(t)$  和由于荧光粉失活导致蓝光辐射增加的增加系数  $\beta_p(t)$ 。两种衰减因素作用过程如图 1 所示。将 PC-LED 的衰减模型,表示为蓝光辐射和黄光辐射的衰减模型的合成,可得衰减后 PC-LED 的 SPD,表示为:

$$\begin{cases} \Phi_B(\lambda, t) = \eta_c(t)\beta_p(t)\Phi_B(\lambda, 0) \\ \Phi_Y(\lambda, t) = \eta_c(t)\epsilon_p(t)\Phi_Y(\lambda, 0) \end{cases} \quad (3)$$

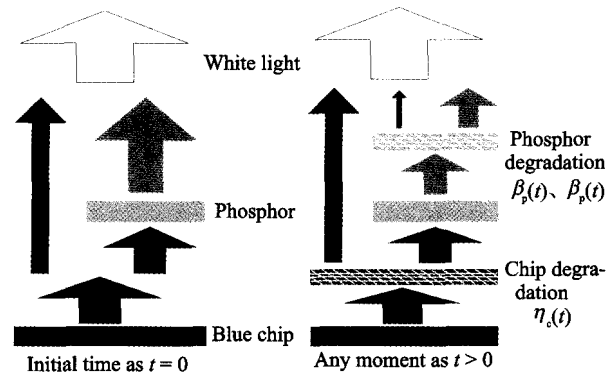


图 1 PC-LED 衰减过程

Fig. 1 Degradation of PC-LED

### 1.2 色坐标数学模型的建立与分析

为建立衰减后的 PC-LED 与色坐标的关系,令衰减后 PC-LED 的蓝光辐射和黄光辐射在 CIE  $x$ - $y$  色品图上的色坐标分别为  $(x_B, y_B)$ 、 $(x_Y, y_Y)$ ,相应的三刺激值分别为  $(X_B, Y_B, Z_B)$ 、 $(X_Y, Y_Y, Z_Y)$ ,根据色品公式<sup>[19]</sup>可知:

$$\begin{cases} X = k \int \Phi(\lambda, t) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int \Phi(\lambda, t) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int \Phi(\lambda, t) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = 1 - x - y \end{cases} \quad (5)$$

将(3)式代入(4)、(5)式,可分别得到衰减后的蓝光辐射( $x_B, y_B$ )以及黄光辐射( $x_Y, y_Y$ )在色品图上的位置,表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} x_B &= \frac{\int \Phi_B(\lambda, 0) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_B(\lambda, 0) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda} \\ y_B &= \frac{\int \Phi_B(\lambda, 0) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_B(\lambda, 0) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda} \\ z_B &= 1 - x_B - y_B \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_Y &= \frac{\int \Phi_Y(\lambda, 0) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_Y(\lambda, 0) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda} \\ y_Y &= \frac{\int \Phi_Y(\lambda, 0) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_Y(\lambda, 0) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda} \\ z_Y &= 1 - x_Y - y_Y \end{aligned} \right. \quad (7)$$

由(6)式得到的蓝光辐射在色品图上的色坐标可知,衰减后的蓝光辐射的色坐标不因蓝光芯片衰减及荧光粉的衰减而改变,即蓝光辐射在 PC-LED 的老化过程中色坐标不发生变化,蓝光辐射的色温也不发生变。同理,(7)式得到的黄光辐射的色坐标,也能得到相同的结论。根据色度学原理<sup>[19]</sup>,可以在色品图上应用重心原理,即两种颜色相加产生的第三种颜色总是位于连接该两种颜色的直线上,由两者比例决定,混合色的色坐标将被拉向比例大的颜色那一侧。PC-LED 的衰减,将导致其色坐标沿着蓝光辐射( $x_B, y_B$ )、黄光辐射( $x_Y, y_Y$ ),做直线偏移。

实验选取正白(A)、暖色(B)两种色调的 PC-LED 进行测试,初始色温分别为 5 358 K、3 072 K,持续点亮 1 400 h。实验数据,如表 1 所示。根据实验数据,绘制两种 PC-LED 的色坐标变化曲线,如图 2 所示。

表 1 两种 PC-LED 的色温及色坐标变化

Tab. 1 Chromaticity coordinates and correlated color temperature of PC-LEDs

	0 h	200 h	500 h	800 h	1 100 h	1 400 h
A	X	0.335 4	0.334 1	0.330 3	0.327 8	0.325 3
	Y	0.337 5	0.334 1	0.326 1	0.321 6	0.317 0
	CCT(K)	5 358	5 412	5 586	5 715	5 855
B	X	0.453 9	0.441 3	0.433 8	0.428 3	0.421 7
	Y	0.458 0	0.449 6	0.440 5	0.436 2	0.428 4
	CCT(K)	3 072	3 214	3 277	3 345	3 412

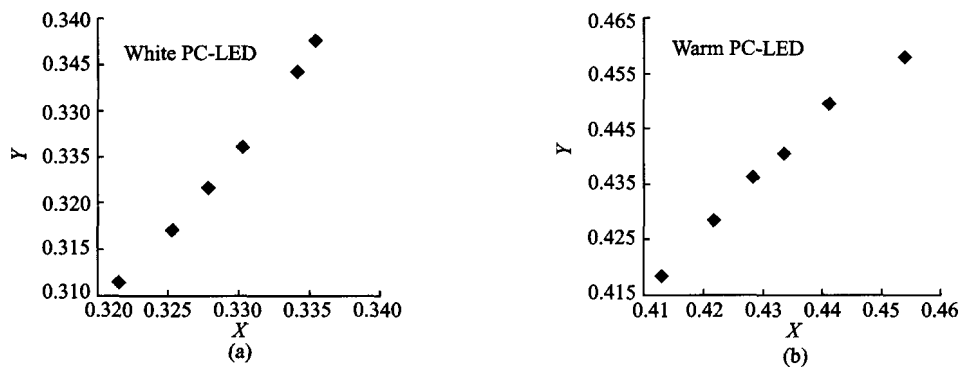


图 2 色坐标变化曲线

Fig. 2 Diagram of chromaticity coordinates

图 2 所示为 PC-LED 在工作 1 400 h 内,色坐标的变化情况,实验现象与前文所述的结论相符合,PC-LED 在长时间工作后,色坐标将沿着黄光辐射、蓝光辐射的方向,近似直线的偏移。依据色品的重力中心原理,两种颜色相加产生混合色,混合色的色坐标,即 PC-LED 的色坐标,将由蓝光辐射( $x_B, y_B$ )及黄光辐射( $x_Y, y_Y$ )的三刺激值总和的比例来决

定<sup>[19]</sup>:

$$\frac{C_B}{C_Y} = \frac{X_B + Y_B + Z_B}{X_Y + Y_Y + Z_Y} \quad (8)$$

$C_B, C_Y$  分别为蓝光辐射和黄光辐射的三刺激值之和。当两者比例确定时,混合色的色坐标将被确定,其色温也被确定;当两者比例发生改变时,混合色的色坐标将被拉向比例大的颜色那一侧,色温将发生改变。依据(3)(8)式,最终蓝光辐射( $x_B, y_B$ )和黄

光辐射  $(x_Y, y_Y)$  的三刺激值总和的比值可表示为式(9):

$$\frac{C_B}{C_Y} = \frac{\eta_c(t)\beta_p(t)k_B}{\eta_c(t)\epsilon_p(t)k_Y} \times \frac{\int \bar{\Phi}_B(\lambda, 0)[\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)]d\lambda}{\int \bar{\Phi}_Y(\lambda, 0)[\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)]d\lambda} \quad (9)$$

为方便描述,式(9)引入了蓝光辐射和黄光辐射的光功率分布的归一化函数  $\bar{\Phi}_B, \bar{\Phi}_Y, k_B, k_Y$  分别为蓝光辐射和黄光辐射的光谱功率分布函数的主波长峰值。(6)、(7)、(9)式推导出蓝光芯片衰减和荧光粉衰减与 PC-LED 色坐标的变化关系,在 PC-LED 老化的过程中,蓝光辐射比重增加,黄光辐射比重下降;当且仅当比值恒为一常数时,PC-LED 的色温不发生改变。

## 2 色温自动控制白光 LED 系统的设计

基于前文提出的 PC-LED 衰减的数学模型,为实现 PC-LED 的色温稳定,须保证(9)式的比值为一定常数。由(9)式推导可知,可以通过减少蓝光辐射或者增加黄光辐射来使得色温保持稳定。通过增加黄光辐射来实现色温稳定,必须使得增加后黄光辐射的 SPD 维持原有形状,即等比例增加,但由于不同生产厂商在荧光粉的配比及制作工艺上的差别,导致黄光辐射的 SPD 不相同,不能找到单一的黄光辐射作为普遍增加量;而蓝光芯片发出的单一的窄带蓝光辐射,具有普遍性,可认为具有相同的 SPD。基于前文所述理论,提出利用 PC-LED 与蓝光 LED 混合发光,实现色温恒定的白光 LED 系统。

利用 PC-LED 和可调蓝光 LED 混合发光,实现色温稳定。如图 3(a)所示,点 PC、B' 分别代表 PC-LED、蓝光 LED 在 CIE x-y 色品图上的位置,通过混色可得到中间色 M,落在普朗克轨迹上。根据前文所述理论,PC-LED 由于长时间使用会出现老化,色温发生偏移,为方便讨论,将 PC-LED 辐射的光分解为蓝光辐射 B、黄光辐射 Y,在 CIE x-y 色品图上的位置,如图 3(b)所示。在图 3(b)上,按重心原理,采用作图法,为满足色温稳定,需满足:

$$\frac{C_B(0)}{C_Y(0)} = \frac{C_B(t)}{C_Y(t)} \quad (10)$$

(10)式中,  $C_B$  为 PC-LED 中的蓝光辐射与蓝光 LED 的蓝光辐射的三刺激值的总和。对于蓝光 LED,考虑到没有涂覆荧光粉,因此不考虑荧光粉衰减,只考虑蓝光芯片,且由于蓝光 LED 为可调量,因

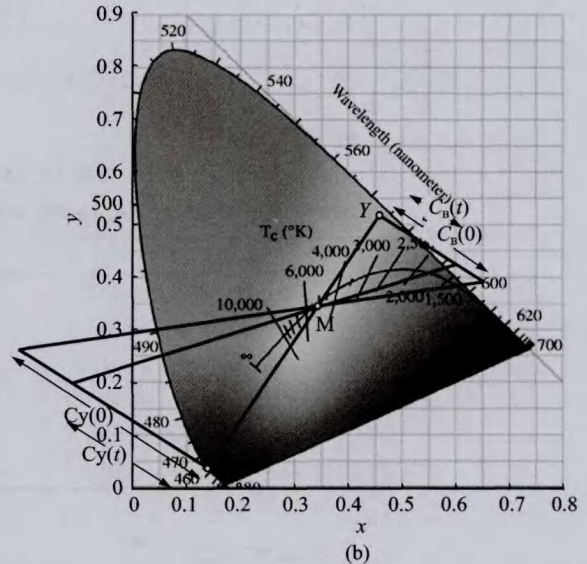
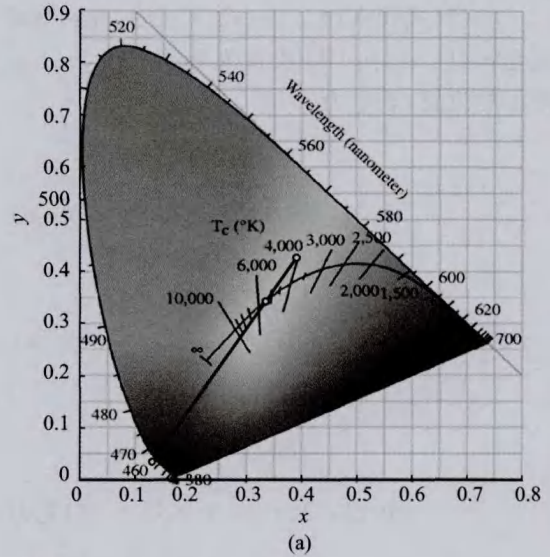


图 3 CIE x-y 色品分析图:(a) PC-LED+蓝光 LED;(b) 蓝光辐射+黄光辐射

Fig. 3 CIE x-y chromaticity analysis diagram:(a) PC-LED and blue LED;(b) Blue-ray radiation and yellow-ray radiation

此对蓝光 LED 射出的蓝光辐射引入一个可调节量  $\Delta k$ , 初始时,认为。所设计色温稳定的白光 LED 系统的数学模型,可由(9)(10)式改进为:

$$\frac{k_B + k_{B'}}{k_Y} = \frac{\eta_c(t)\beta_p(t)k_B + \Delta k \cdot \eta'_c(t)k_{B'}}{\eta_c(t)\epsilon_p(t)k_Y} \quad (11)$$

$k_{B'}$  为蓝光 LED 蓝光辐射的光谱功率分布函数的主波长峰值,  $\eta'_c(t)$  为蓝光 LED 的蓝光芯片衰减系数。工程设计中,引入辐射功率,(11)式可修正为:

$$\frac{\int \bar{\Phi}_B(\lambda, 0)d\lambda}{\int \bar{\Phi}_Y(\lambda, 0)d\lambda} \times \frac{k_B + k_{B'}}{k_Y} = \frac{\int \bar{\Phi}_B(\lambda, 0)d\lambda}{\int \bar{\Phi}_Y(\lambda, 0)d\lambda} \times$$

$$\frac{\eta_c(t)\beta_p(t)k_B + \Delta k \cdot \eta'_c(t)k_{B'}}{\eta_c(t)\epsilon_p(t)k_Y} \quad (12)$$

由(12)式可以引入 PC-LED 的蓝光辐射功率  $P_B(t)$ , 黄光辐射亮度  $P_Y(t)$  以及蓝光 LED 的蓝光辐射亮度  $P_{B'}(t)$ 。式(10)最终结果可以表示为:

$$\frac{P_B(0) + P_{B'}(0)}{P_Y(0)} = \frac{P_B(t) + \Delta k \cdot P_{B'}(t)}{P_Y(t)} \quad (13)$$

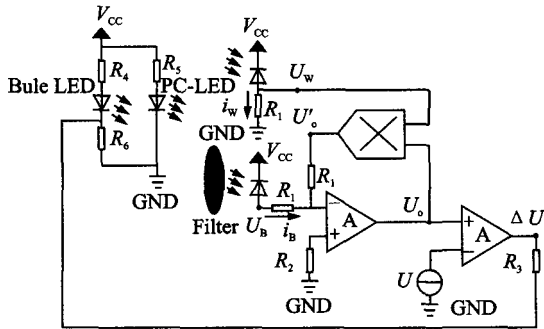


图 4 色温自动控制的白光 LED 系统

Fig. 4 White-LED system with auto control of color temperature

根据前文所述理论,为保证色温稳定,必须满足(13)式。以(14)式提供的系统模型为理论基础,需将白光辐射分别用滤光片对蓝光辐射和黄光辐射分别进行过滤。从工程成本考虑,只采用一块蓝色滤光片进行系统设计,文中提出利用蓝光辐射与全白光辐射的比值来确定色温。因此,(13)式可以改进为:

$$\frac{P_B + P_{B'}}{P_W} = \frac{P_B + P_{B'}}{P_Y + P_B + P_{B'}} = \frac{1}{\frac{P_Y}{P_B + P_{B'}} + 1} \quad (14)$$

(14)式表明,当蓝光辐射与全白光辐射的比值确定,即,蓝光辐射与黄光辐射的比值确定,色温恒定。蓝光辐射与全白光辐射的比值存在一个恒定常数  $C$ ,使得白光 LED 的色品坐标落在普朗克轨迹上,(13)式可改进为:

$$C = \frac{P_B(0) + P_{B'}(0)}{P_W(0)} = \frac{P_B(t) + \Delta k \cdot P_{B'}(t)}{P_W(t)} \quad (15)$$

基于(15)式提出的系统模型进行色温稳定的白光 LED 系统设计,白光 LED 系统设计方案如图 4 所示。为实现色温的自动控制,在系统中引入负反馈机制。白光 LED 系统采用蓝色滤光片,将白光 LED 系统的光辐射分为蓝光辐射和全白光辐射两个通道,分别经过光电二极管进行光电转换,生成光电流  $i_w$ 、 $i_B$ ,辐射功率比转化为光电流比,可得:

$$C = \frac{P_B + P_{B'}}{P_W} = \frac{i_w}{i_B} = \frac{U_w}{U_B} \quad (16)$$

运算放大器 A 与乘法器 K 组成除法运算电路,

如图 4 所示。电路等效公式可表示为:

$$U_o = -\frac{U_B}{KU_w} \quad (17)$$

引入基准电压  $U$ ,为参考电压,将(16)式代入(17)式,可得基准电压的计算方法:

$$U = -\frac{C}{K} \quad (18)$$

利用运算放大器,比较  $U_o$ 、 $U$  的大小,对  $U_o$ 、 $U$  的差值放大后反馈,反馈量作用于系统中的可调蓝光 LED。当蓝光比例加大,  $U_o > U$ ,  $\Delta U$  经放大,作用于蓝光 LED,使得管压降减小,流过蓝光 LED 的电流减小,光功率下降,蓝光比例随之下降;反之,亦然。从而实现色温自动控制且色温稳定。

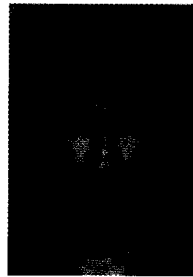
### 3 结 论

针对 PC-LED 在长时间工作后会出现色温偏移的问题,理论上分析了影响色温的两种衰减因素。同时考虑了芯片衰减和荧光粉衰减,提出数学模型进行理论分析。实验发现,PC-LED 在长时间工作后,色坐标将沿着黄光辐射-蓝光辐射方向偏移,色温发生变化。利用数学建模的方法对 PC-LED 的衰减过程进行了理论分析,与实验现象相符合。提出了一种采用蓝光 LED 与 PC-LED 混合,通过反馈控制蓝光 LED,保证蓝光辐射在全白光中的比例恒定,实现色温稳定的设计方法。提出的设计方案为色温稳定的白光 LED 照明系统的实现提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] 李林,王光珍,王丽莉,等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. 光学学报,2012,32(2):0222002.
- [2] 邴树奎,高杰. LED 在照明工程中的应用[J]. 照明工程学报,2010,(5):101-108.
- [3] Meneghini M, Tazzoli A, Mura G, et al. A review on the physical mechanisms that limit the reliability of GaN-based LEDs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices,2010,57(1):108-118.
- [4] 杨新平,王秀峰,江红涛,等. 白光 LED 用 YAG:Ce3+ 荧光粉制备及其性能研究进展[J]. 材料导报,2010,24(5):39-44.
- [5] 周舟,冯士维,郭春生,等. 功率型白光 LED 光学特性退化分析[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(10):2612-2614.
- [6] ENERGY STAR® Program requirements for integral LED lamps partner commitments[R]. Department of Energy,US,2013.
- [7] 陈冬灵,林志贤. 三基色光源连续色温调控方法的研究

- [J]. 计算机与现代化, 2012, 6: 179-182.
- [8] Zhong Ping, He Guoxing, Zhang Minhao. 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.
- [9] Sugiura L. Comparison of degradation caused by dislocation motion in compound semiconductor light-emitting devices [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(10): 1317-1319.
- [10] Pavesi M, Rossi F, Zanoni E. Effects of extreme dc-ageing and electron-beam irradiation in InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 2006, 21(2): 138-143
- [11] Min-Ki K, Il-Kyu P, Ja-Yeon K, et al. Gradient doping of Mg in p-type GaN for high efficiency InGaIn-GaN ultraviolet light-emitting diode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(23): 1880-1882.
- [12] Kang J M, Kim J W, Choi J H, et al. Life-time estimation of high-power blue light-emitting diode chips[J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(9-11): 1231-1235.
- [13] Mueller-Mach R, Mueller G O, Krames M R, et al. High-power phosphor converted light-emitting diodes based on III-nitrides [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(2): 339-345.
- [14] Meneghini M, Trevisanello L, Sanna C, et al. High temperature electro-optical degradation of InGaIn/GaN HBLEDs[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(9-11): 1625-1629.
- [15] Meneghesso G, Meneghini M, Zanoni E, et al. Recent results on the degradation of white LEDs for lighting [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(35): 354007.
- [16] Jung E, Ryu J H, Hong C H, et al. Optical degradation of phosphor-converted white GaN-based light emitting diodes under electro-thermal stress[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2011, 158(2): H132-H136
- [17] Chen Huanting, Hui S Y. Dynamic prediction of correlated color temperature and color rendering index of phosphor-coated white light-emitting diodes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 784-797
- [18] 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.
- [19] 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, 2009: 112-129.



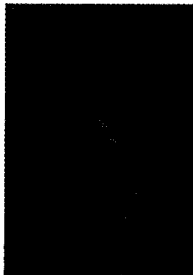
李毓钦(LI Yuqin) 男, 1989年生, 硕士研究生, 主要从事光电设计方面的研究。

陈长纓(CHEN Changying) 男, 1955年生, 教授, 主要研究无线光通信与电子通讯技术。



(上接第 145 页)

- [2] Jeong J, Pornpromlikit S, Scuderi A, et al. High power digitally-controlled SOI CMOS attenuator with wide attenuation range [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(8): 433-435.
- [3] Shahidi G G. SOI technology for the GHz era[J]. IBM Journal of Research and Development, 2002, 46(2/3): 121-131.
- [4] Orlando P, Groves K, Mattamana A, et al. X-band receiver front-end in fully depleted SOI technology [C]. IEEE International Conference on Ultra-Wide-band Digest, 2012, : 288-291.
- [5] Blaschke V, Zwingman R, Hurwitz P, et al. A linear-throw SP6T antenna switch in 180 nm CMOS thick-film SOI[C]. IEEE International Conference on Microwave Communication Antennas and Electronics Systems Digest, 2011: 1-4.



蒋东铭(JIANG Dongming) 男, 1978年生, 2007年毕业于东南大学电路与系统专业, 获硕士学位, 现在南京国博电子有限公司从事射频微波集成电路设计研究。